

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO CARRO PORTA-REBOLO NUMA  
RETIFICADORA CNC FLEXA 600-L COM O AUXÍLIO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCIANO SENA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 2007



---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE POSICIONAMENTO DO CARRO PORTA-REBOLO NUMA  
RETIFICADORA CNC FLEXA 600-L COM O AUXÍLIO DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

LUCIANO SENA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO  
SENDO APROVADA EM SUA FORMA FINAL.

---

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner  
Orientador

---

Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau  
Co-orientador

---

Prof. Fernando Cabral, Ph.D.  
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.  
Presidente

---

Prof. Dr. Eng. André Roberto de Sousa

---

Prof. Dr.-Ing. Joel Martins Crichigno Filho

---

Prof. Dr. Eng. Milton Pereira



A Deus

Aos meus queridos pais, Amauri e Gracinha

Aos meus irmãos, Fabrício e Fabiano

Aos meus tantos e bons amigos

À Emanuella, minha linda noiva



---

## Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, coordenador do LMP- Laboratório de Mecânica de Precisão, pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho, e pela amizade. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau, pelo apoio e valiosas sugestões. Ao Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter, exemplo de comportamento ético-profissional.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pelo apoio financeiro através de concessão da bolsa de estudos. À empresa Renault do Brasil, pelo suporte dado através do Projeto Verde Amarelo – VA. À FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos –, pela participação no financiamento do Projeto VA, que possibilitou a aquisição e manutenção de equipamentos imprescindíveis para a realização deste trabalho. Ao Laboratório de Mecânica de Precisão, pela infra-estrutura disponibilizada para a realização da presente pesquisa.

Aos meus pais, Amauri e Gracinha, pela dedicação, amor, apoio e carinho incondicionais, recebidos no decorrer de toda a minha vida. Ao meu irmão Fabricio, pela amizade e por ser tão bom exemplo, sob tantos aspectos e ao meu irmão Fabiano (*in memorian*), companheiro de tantas aventuras, amigo confidente e cúmplice das coisas vida.

À minha noiva Emanuella, por me mostrar um lado da vida que até então desconhecia, reino de carinho, apoio, maturidade e respeito.

Aos Mestres Engenheiros Helton Cláudio Bertol, Sherline, Ângelo Boeira, Thiago Klein, Eduardo Weingätner, Oliver, Allan Frederico Godinho, Marcelo Sunada, Cristian Mangoni (*in memorian*), Irapuan Santos, Durval de Barba Junior, Henrique “Animal” B. Muller, Willian Jefferson González Castillo, André D. Wilbert, Felipe Tadeu Macedo e Joviano J. Cararin pela contribuição material significativa em termos de fontes de pesquisa, pela amizade e companheirismo demonstrados no decorrer do meu curso de mestrado e/ou da minha vida acadêmica

A todos, que de certa maneira, contribuíram para a conclusão deste trabalho.





## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	14
LISTA DE TABELAS .....	18
SIMBOLOGIA E ABREVIACÕES .....	20
RESUMO .....	28
ABSTRACT .....	29
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>32</b>
1.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	33
1.2. OBJETIVOS .....	34
1.2.1. Objetivo específico .....	35
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>36</b>
2.1. USINAGEM COM FERRAMENTAS DE GEOMETRIA NÃO DEFINIDA .....	36
2.1.1. O processo de retificação .....	37
2.1.2. Formação dos cavacos .....	39
2.1.3. Força de corte na retificação .....	40
2.1.4. Distribuição de energia na retificação .....	40
2.1.5. Cinemática do processo de retificação .....	41
2.1.6. Desgaste dos rebolos .....	44
2.2. FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADAS NA RETIFICAÇÃO .....	47
2.2.1. Materiais abrasivos .....	49
CBN - Aspectos tecnológicos e econômicos .....	50
Diamante – Aspectos tecnológicos e econômicos .....	52
2.2.2. Ligantes .....	53
2.2.3. Dureza e estrutura do rebolo .....	53
2.3. CONDICIONAMENTO DE REBOLOS .....	54
2.3.1. Perfilamento .....	55
2.3.2. Afiação .....	55
2.3.3. Limpeza .....	55
2.3.4. Dressamento .....	55
2.3.5. ECDM – Usinagem por descargas eletroquímicas .....	55
2.3.6. Dressadores para rebolos cerâmicos vítreos e resinóides .....	56
Dressadores fixos .....	57
Dressadores acionados .....	58
2.3.7. Variáveis de processo no dressamento .....	59



2.4.	RETIFICADORAS.....	61
2.4.1.	<i>Componentes de uma retificadora .....</i>	62
	Estrutura de uma retificadora.....	63
	Sistemas de fixação da peça em retificadoras.....	63
	Sistemas de fixação da ferramenta em retificadoras.....	64
	Sistema de guias .....	66
	Sistema de avanço .....	67
	Sensores de posição .....	67
	Trocadores de calor.....	69
2.4.2.	<i>Sistemas de detecção de toque ferramenta /peça.....</i>	70
2.5.	O DESEMPENHO GEOMÉTRICO .....	72
2.5.1.	<i>Verificação de máquinas-ferramentas .....</i>	74
	Método de verificação por peça padrão.....	74
	Método de verificação por ensaios geométricos.....	74
2.6.	INTERFEROMETRIA .....	75
2.7.	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	76
2.7.1.	<i>Emissão acústica.....</i>	79
	Tipos de sinais de emissão acústica.....	80
	Características das ondas acústicas.....	81
	Características dos sinais.....	82
	Processamento dos sinais de EA .....	82
2.7.2.	<i>Acoplamentos acústicos e sensores .....</i>	85
3.	<b>MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>87</b>
3.1.	A MÁQUINA-FERRAMENTA.....	87
3.1.1.	<i>Características gerais da máquina-ferramenta.....</i>	87
3.1.2.	<i>Sistemas de monitoramento da EA .....</i>	89
3.1.3.	<i>Sistema hidráulico.....</i>	90
	Monitoramento da pressão .....	90
	Monitoramento da temperatura do reservatório de óleo .....	91
3.1.4.	<i>Sistema de resfriamento do óleo hidráulico .....</i>	91
	Monitoramento da temperatura e da pressão da água.....	91
3.1.5.	<i>Sistema lubrificante.....</i>	92
3.1.6.	<i>Sistema de dressamento.....</i>	92
3.2.	REBOLO .....	93
3.3.	SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA.....	94
3.4.	LASER INTERFEROMÉTRICO .....	96
4.	<b>GRANDEZAS MEDIDAS.....</b>	<b>97</b>
4.1.	ERRO DE POSICIONAMENTO – EP .....	97
4.1.1.	<i>Erro de posicionamento ao longo de X com SISLASER – Ep<sub>XL</sub>.....</i>	97



4.1.2.	<i>Erro de posicionamento ao longo de Z com SISEA – <math>Ep_z</math></i> .....	98
4.2.	TEMPO DE WARM UP – $T_w$ – E DA TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO – $T_R$ .....	98
<b>5.</b>	<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>99</b>
5.1.	MEDIÇÃO DO ERRO AO LONGO DE X COM SISLASER – $Ep_{xl}$ .....	99
5.2.	MEDIÇÃO DO ERRO AO LONGO DE Z COM SISEA – $Ep_z$ .....	101
5.3.	TEMPO DE WARM UP – $T_w$ .....	103
5.3.1.	<i>Determinação de <math>t_w</math> pela análise de <math>T_R</math></i> .....	104
5.3.2.	<i>Determinação do <math>t_w</math> pela análise de <math>Ep_z</math></i> .....	104
<b>6.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>105</b>
6.1.	O ERRO DE POSICIONAMENTO $Ep_{xl}$ .....	105
6.1.1.	<i>Comportamento <math>Ep_{xl}</math> em função do tempo de funcionamento</i> .....	105
6.1.2.	<i>Comportamento médio de <math>Ep_{xl}</math></i> .....	109
6.2.	REPETITIVIDADE DE POSICIONAMENTO $Ep_z$ .....	111
6.3.	O TEMPO DE WARM UP .....	113
6.3.1.	<i>Determinação do tempo de warm up em função de <math>T_R</math></i> .....	114
6.3.2.	<i>O tempo de warm up em função de <math>Ep_z</math></i> .....	117
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS.....</b>	<b>119</b>
7.1.	CONCLUSÕES .....	119
7.2.	SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS .....	120
<b>8.</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>123</b>
	ANEXO 1 – PERFIS DE REBOLOS .....	129
	ANEXO 2 – DISCO DRESSADOR DIAMANTADO .....	130
	ANEXO 3 – DADOS REFERENTES ÀS MEDIÇÕES COM SISLASER .....	131
	ANEXO 4 – COMPORTAMENTO DE $Ep_{xl}$ PARA QUATRO, SEIS E OITO HORAS.....	135
	ANEXO 5 – ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE $Ep_{xl}$ .....	137
	ANEXO 6 – ERRO DE POSICIONAMENTO $Ep_z$ .....	138
	ANEXO 8 – AQUECIMENTO DO ÓLEO DO HIDRÁULICO.....	140
	ANEXO 9 – TEMPO DE WARM UP EM FUNÇÃO DE $Ep_z$ .....	141



## Lista de figuras

FIGURA 2.1 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO SEGUNDO A DIN 8589 .....	36
FIGURA 2.2 – RELAÇÃO ENTRE GRANDEZAS DE ENTRADA E RESULTADO NA RETIFICAÇÃO.....	38
FIGURA 2.3 – PENETRAÇÃO DE UM GUME ABRASIVO NO INÍCIO DO CORTE NA RETIFICAÇÃO .....	39
FIGURA 2.4 – DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA RETIFICAÇÃO .....	41
FIGURA 2.5 – RELAÇÃO DE $H_{CU}$ COM VARIÁVEIS DE ENTRADA E AS CONDIÇÕES DE CONTATO .....	42
FIGURA 2.6 – INFLUÊNCIA DA TAXA DE RETIF. ESPECÍFICA SOBRE A ATUAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE.....	45
FIGURA 2.7 – DESGASTES RADIAL – $\Delta_{RSK}$ –, DE QUINA – $\Delta_{RSK}$ – E TOTAL – $\Delta_{SC}$ .....	46
FIGURA 2.8 – FORMAS DE DESGASTE DO GRÃO E DO LIGANTE. ....	46
FIGURA 2.9 – REBOLOS MACIÇOS (A) E NÃO MACIÇOS (B).....	47
FIGURA 2.10 – COMPONENTES VOLUMÉTRICAS DE UM REBOLO.....	48
FIGURA 2.11 – SEÇÃO DE UM REBOLO. ....	49
FIGURA 2.12 – EFEITO DA TEMPERATURA NOS DIFERENTES MATERIAIS DE GRÃOS ABRASIVOS .....	50
FIGURA 2.13 – DUREZA KNOOP PARA DIFERENTES MATERIAIS DE GRÃOS ABRASIVOS.....	52
FIGURA 2.14 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CONDICIONAMENTO DE REBOLOS. ....	55
FIGURA 2.15 – REBOLO METÁLICO AFIADO POR PROCESSO CONVENCIONAL (A) E POR ECDM (B) .....	56
FIGURA 2.16 – AS FORMAS DE DRESSAMENTO MAIS USUAIS. ....	56
FIGURA 2.17 – FERRAMENTAS DE PERFILAR ESTÁTICAS .....	57
FIGURA 2.18 – FERRAMENTAS DE DRESSAMENTO ACIONADAS.....	59
FIGURA 2.19 – VAR. DA RUG. INICIAL FUNÇÃO DA REL. DE VEL. NOS DRESS. CONCORDANTE E DISCORDANTE.....	60
FIGURA 2.20 – EVOLUÇÃO DA PRECISÃO NA USINAGEM NO SÉCULO XX .....	62
FIGURA 2.21 – SISTEMA DE MONTAGEM DA PEÇA EM RETIFICADORA CILÍNDRICA. ....	64
FIGURA 2.22 – REBOLO MONTADO NUM FLANGE. ....	65
FIGURA 2.23 – REGIÕES DE UMA GUIA HIDROSTÁTICA LINEAR. ....	66
FIGURA 2.24 – FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTE .....	67
FIGURA 2.25 - ENCODER ANGULAR ÓPTICO. ....	68
FIGURA 2.26 – SISTEMA CONTROLADO DE MOVIMENTAÇÃO LINEAR .....	69
FIGURA 2.27 – TROCADOR DE CALOR DE CASCO E TUBOS .....	70
FIGURA 2.28 – TIPOS DE SENSORES DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	71
FIGURA 2.29 - ERROS PARA DESLOCAMENTO NUMA MÁQUINA-FERRAMENTA.....	73
FIGURA 2.30 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO INTERFERÔMETRO DE MICHELSON.....	76
FIGURA 2.31 – TIPOS DE SENSORES EXISTENTES EM AMBIENTE DE MANUFATURA .....	78
FIGURA 2.32 - FREQUÊNCIAS DO SINAL DE CORTE E RUÍDO E EFICIÊNCIA DO SENSOR .....	79
FIGURA 2.33 – TIPOS DE SINAIS DE EA .....	81
FIGURA 2.34 – FONTES DE GERAÇÃO DE EA.....	81
FIGURA 2.35 – FILTRAGEM RMS SOBRE O SINAL BRUTO DE EA.....	84
FIGURA 2.36 – EFEITO DA TAXA DE AMOSTRAGEM NA DIGITALIZAÇÃO DOS SINAIS .....	85
FIGURA 3.1 – RETIFICADORA CNC UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS. ....	87





---

FIGURA 3.2 – LAYOUT DO SISTEMA DE GUIAS DA MÁQUINA FERRAMENTA. ....	89
FIGURA 3.3 – SISTEMAS EA DITTEL E SENSIS E INVERSOR DE FREQUÊNCIAS DO SISTEMA DE DRESSAMENTO. ....	90
FIGURA 3.4 – SISTEMA DE ACIONAMENTO DO FLUIDO LUBRIFRIGERANTE. ....	92
FIGURA 3.5 – SISTEMA DE DRESSAMENTO INSTALADO NA RETIFICADORA FLEXA 600-L. ....	93
FIGURA 3.6 – MONTAGEM DO REBOLO CERÂMICO-VÍTREO DE CBN NA RETIFICADORA ZEMA. ....	94
FIGURA 3.7 – SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA PARA MEDIÇÕES COM EA. ....	95
FIGURA 3.8 – PASTILHA DE $Al_2O_3$ PARA A SUPERFÍCIE DE REFERÊNCIA. ....	96
FIGURA 5.1 - DISPOSIÇÃO DO LASER PARA AS MEDIÇÕES DE ERRO DE POSICIONAMENTO COM O SISLASER. ....	100
FIGURA 5.2 – EXPERIMENTO DE MEDIÇÃO COM O SISLASER. ....	101
FIGURA 5.4 – AVALIAÇÃO DO ERRO DE POSICIONAMENTO COM A REFERÊNCIA NA MÁQUINA – $E_{PM}$ . ....	102
FIGURA 6.1 – ERRO DE POSICIONAMENTO $\bar{E}_{p_{XL}}$ PARA DUAS HORAS DE FUNCIONAMENTO. ....	106
FIGURA 6.2 – COMPORTAMENTO TEMPORAL MÉDIO DE $\bar{E}_{p_{XL}}$ . ....	107
FIGURA 6.3 – VARIAÇÃO DO ERRO $\bar{E}_{p_{XL}}$ EM FUNÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO DECORRIDO DE ENSAIO. ....	108
FIGURA 6.4 – ERRO DE POSICIONAMENTO EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO. ....	110
FIGURA 6.5 – ERRO DE POSICIONAMENTO $\bar{E}_{p_z}$ EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO EM LONGITUDINAL. ....	112
FIGURA 6.6 – SISTEMA DE ACIONAMENTO DO CIRCUITO HIDRÁULICO. ....	113
FIGURA 6.7 – TEMPERATURA DO ÓLEO VERSUS O TEMPO DE FUNCIONAMENTO DA RETIFICADORA. ....	115
FIGURA 6.8 – COMPORTAMENTO MÉDIO DA TEMPERATURA DO ÓLEO DO HIDRÁULICO. ....	116
FIGURA 6.9 – ERRO DE POSICIONAMENTO $\bar{E}_{p_z}$ EM FUNÇÃO DO TEMPO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA. ....	117



---

## *Lista de tabelas*

TABELA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO DOS GRÃOS DE CBN DE ACORDO COM A SUA ESTRUTURA. ....	51
TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES DE POSIÇÃO. ....	68
TABELA 3.1 – ESPECIFICAÇÕES DA MÁQUINA-FERRAMENTA. ....	88
TABELA 3.2 – PRESSÕES DE FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO HIDRÁULICO DA FLEXA 600-L. ....	91
TABELA 3.3 – DISCO DIAMANTADO EMPREGADO NO DRESSAMENTO DO REBOLO VITRIFICADO.....	93
TABELA 3.4 - CARACTERÍSTICAS DO REBOLO DE CBN COM LIGANTE VITRIFICADO .....	94
TABELA 5.1 – COORD. DE REFERÊNCIA PARA OS TESTES DE REPETITIVIDADE AO LONGO DA DIREÇÃO TRANSVERSAL. ....	99



## Simbologia e abreviações

### Romanas minúsculas

Símbolo	Unidade	Nome
$a_e$	[mm]	Profundidade de corte
$a_{ed}$	[mm]	Profundidade de penetração no dressamento
$b_D$	[mm]	Largura efetiva do rebolo
$b_d$	[mm]	Largura efetiva da ferramenta de perfilar
$d_\alpha$	[rad]	Arfagem
$d_\beta$	[rad]	Guinada
$d_\gamma$	[rad]	Rolamento
$d_s$	[mm]	Diâmetro do rebolo
$d_{se}$	[mm]	Diâmetro equivalente
$d_w$	[mm]	Diâmetro da peça
$d_x$	[mm]	Erro de deslocamento em x
$d_y$	[mm]	Erro de deslocamento em y
$d_z$	[mm]	Erro de deslocamento em z
$h_{cu}$	[mm]	Espessura de usinagem
$h_{cu} / \rho_s$	[-]	Grau de afiação
$k$	[-]	Fator de proporcionalidade
$q_d$	[-]	Relação de velocidades no dressamento
$s$	[-]	Desvio padrão da média
$t$	[-]	Coeficiente de Student
$t_c$	[s]	Tempo de corte
$t_w$	[s]	Tempo de <i>warm up</i>
$v_{fad}$	[mm/s]	Velocidade de alimentação axial no dressamento
$v_{frd}$	[mm/s]	Velocidade de alimentação radial no dressamento
$v_s$	[m/s]	Velocidade do rebolo
$v_{rd}$	[mm/s]	Velocidade do disco ou rolo dressador
$v_{sd}$	[mm/s]	Velocidade do rebolo no dressamento
$v_w$	[m/s]	Velocidade da peça



$x_i$  [-] Valor do evento

### Romanas maiúsculas

Símbolo	Unidade	Nome
$A_{sc}$	$[mm^2]$	Superfície de desgaste total
$A_{sk}$	$[mm^2]$	Superfície de desgaste de quina
$A_{sr}$	$[mm^2]$	Superfície de desgaste radial
$Al_2O_3$		Óxido de Alumínio
$B_2O_3$		Óxido de Boro
CBN		<i>Cubic Boron Nitride</i> – Nitreto de Boro Cúbico
$C_{stat}$	$[mm^{-3}]$	Densidade estática dos gumes
$\Delta_{2-4}$	$[mm]$	Variação média de $Ep_{XL}$ de duas para quatro horas
$\Delta_{4-6}$	$[mm]$	Variação média de $Ep_{XL}$ de quatro para seis horas
$\Delta_{4-8}$	$[mm]$	Variação média de $Ep_{XL}$ de quatro para oito horas
$\Delta_{6-8}$	$[mm]$	Variação média de $Ep_{XL}$ de seis para oito horas
$Ep_{XL}$	$[mm]$	Erro de pos. em X ao longo de X com SISLASER
$Ep_Z$	$[mm]$	Erro de posicionamento em X ao longo de Z com SISEA
$F_{ns}$	$[N]$	Força normal à superfície de corte
$F_{ts}$	$[N]$	Força no sentido do corte
He	$[-]$	Histerese
$l_k$	$[mm]$	Comprimento do cavaco
$Q'_w$	$[mm^3/mm.s]$	Taxa de retificação específica
$Q_w$	$[mm^3/s]$	Taxa de remoção de material
$R_s$	$[-]$	Resolução
$R_{ts}$	$[\mu m]$	Rugosidade efetiva
$R_{ts0}$	$[\mu m]$	Rugosidade inicial
$R_{zw}$	$[\mu m]$	Rugosidade da peça
SiC		Carboneto de Silício
TR	$[^\circ C]$	Temperatura do óleo do reservatório





---

$T_{\mu}$	[mm]	Penetração de início de corte
$U_d$	[-]	Grau de recobrimento no dressamento
$V$	[mm <sup>3</sup> ]	Volume total do rebolo
$V'_w$	[mm <sup>2</sup> ]	Volume usinado específico
$VB$	[mm <sup>3</sup> ]	Volume do ligante
$VK$	[mm <sup>3</sup> ]	Volume dos grãos
$VP$	[mm <sup>3</sup> ]	Volume dos poros
$V_w$	[mm <sup>3</sup> ]	Volume de material usinado da peça

### Gregas minúsculas

Símbolo	Unidade	Nome
$\alpha$	[-]	Constante experimental
$\beta$	[-]	Constante experimental
$\gamma$	[-]	Constante experimental
$\lambda$	[m]	Comprimento de onda
$\mu$	[-]	Valor médio dos eventos
$\rho$	[mm]	Raio do gume do grão
$\sigma$	[-]	Desvio padrão

### Gregas maiúsculas

Símbolo	Unidade	Nome
$\eta$	[grau]	Ângulo de ataque
$\Delta_{rs}$	[mm <sup>2</sup> ]	Desgaste radial
$\Delta_{rsk}$	[mm <sup>2</sup> ]	Desgaste de quina
$\Delta_{sc}$	[mm <sup>2</sup> ]	Desgaste total
$\Delta_{rswr}$	[ $\mu$ m]	Desgaste do rebolo

### Abreviações

CBN	Nitreto de Boro Cúbico
-----	------------------------



---

CERTI	Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
CNC	Comando numérico computadorizado
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
Co	Correção
CRN	Característica de Resposta Nominal
CRR	Característica de Resposta Real
DM	Dispositivo mostrador / Indicador
DWH	Diamant Werkzeug Hammeln
EA	Emissão Acústica
EA	Erro Aleatório
ECDM	Usinagem por descarga eletroquímica
ECM	Electro Chemical Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
EG	Erro grosseiro
E <sub>max</sub>	Erro máximo
E <sub>p</sub>	Erro de posicionamento
ES	Erro sistemático
E <sub>Se</sub>	Estabilidade da sensibilidade
FEPA	Federação Européia de produtores de abrasivos
FFT	Fast Fourier Transform
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normal. e Qualidade Industrial
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Diodo emissor de luz
LMP	Laboratório de mecânica de precisão
RMS	Root Mean Square
SISEA	Sistema de medição do erro de posicionamento baseado em EA e no sistema de medição intrínseco da máquina-ferramenta
	uma de medição do erro de posicionamento baseado no uso de LASER
	superfície de Referência

## Resumo

A retificação contribui de modo significativo para a satisfação das crescentes exigências nas tolerâncias dimensionais e geométricas na usinagem. As ferramentas de corte do processo de retificação, denominadas rebolos, precisam passar por operações periódicas de adequação das suas características funcionais. O conjunto destas operações é denominado condicionamento. Nas máquinas-ferramentas comandadas numericamente empregadas na retificação, a qualidade do sistema de posicionamento relativo ferramenta/peça de trabalho exerce grande influência sobre os resultados obtidos nas operações de retificação e nas de condicionamento. O sucesso do processo de retificação deve-se, em parte, ao emprego de rebolos de CBN em retificadoras comandadas numericamente. Para rebolos com ligante cerâmico-vítreo, o condicionamento é denominado dressamento, uma vez que o perfilamento e a afiação são realizados simultaneamente. As ferramentas de dressamento empregadas de maior rendimento são os discos rotativos. No uso de discos rotativos é verificado um pequeno desgaste radial dos mesmos, o que se reflete sobre a geometria do rebolo e da peça. A literatura não apresenta muitas informações sobre este desgaste e sua influência sobre os resultados na retificação de componentes de elevada exatidão. Este trabalho apresenta um método de medição na direção radial do disco dressador, auxiliada por um sistema de monitoramento por emissão acústica e pelo sistema de medição intrínseco da retificadora – SISEA –, com o objetivo de avaliar o desgaste dos discos dressadores diamantados no dressamento de rebolos de CBN com ligante cerâmico-vítreo. A validação das medições de posicionamento do disco dressador em relação a superfícies de referência é efetuada por comparação com os resultados obtidos com o auxílio de um sistema baseado em interferometria óptica – SISLASER, para diversas condições de estabilização térmica da máquina-ferramenta.

Palavras chave: retificação, dressamento, disco dressador, desgaste radial, CBN.



## ***Abstract***

The grinding process contributes expressively for the increasing demands in terms of dimensional and geometric tolerances in machining. The machining tools, denominated grinding wheels, must have their functional characteristics periodically adjusted. These operations become the general denomination “conditioning”. In the CNC grinding machines, the quality of the positioning system has a great influence on the obtained results in grinding and conditioning operations. The success of the grinding process, in part, is due to the application of CBN wheels in CNC machines. For vitrified CBN wheels, the conditioning operation is called dressing, because the profiling and the sharpening are simultaneous. The most indicated tools are rotating discs. In the application of such discs there is always a little radial wear, influencing the grinding wheel and the workpiece geometry. The literature doesn't present good informations about such wear and its influence on grinding of high precision components results. With the objective of evaluating the wear of the diamante dressing discs in the dressing of CBN wheels with vitro-ceramic bounds, this work presents a method for measuring in the radial direction of the dressing disc, with an Acoustic Emission detection system – SISEA –, for the verification the radius variation in the dressing discs. The validation of the measurement results with AE is obtained in the comparison with results obtained with a LASER system – SISLASER – for several conditions of thermal stabilization for the machine tool.

Keywords: Grinding, dressing, dressing disc, radial waste, CBN.



## 1. Introdução

O sistema de posicionamento do carro porta-rebolo de máquinas retificadoras comandadas numericamente deve ser compatível com a exatidão requerida nas peças produzidas. Por isto, projetistas, fabricantes e usuários de tais máquinas devem fazer uso dos componentes, dos sistemas, assim como das técnicas de projeto mais adequados, e tomar os cuidados necessários relativos à instalação e uso de tais equipamentos [01].

O sistema de medição do posicionamento é definido já na fase de concepção e projeto da máquina-ferramenta. Em retificadoras CNC, as réguas ópticas são amplamente difundidas e, em casos especiais, são empregados sistemas interferométricos.

A verificação da qualidade do sistema de posicionamento deve se dar com o auxílio de um sistema de medição apropriado, baseado em interferometria óptica conforme orientações da ISO 230-2. O emprego de tal sistema consiste num procedimento moroso e de alto custo.

Os processos de usinagem com abrasivos são caracterizados pela remoção de material através da ação conjunta de grãos abrasivos ativos e são predominantemente utilizados para as operações de acabamento de superfícies em peças [01].

Nos últimos anos, as exigências relativas às tolerâncias dimensionais e geométricas, assim como à qualidade das superfícies usinadas em peças metal-mecânicas têm se tornado cada vez maiores. Por contribuir de modo significativo para a satisfação de tais exigências, a retificação tem se destacado dentre os demais processos abrasivos [01, 02, 03].

O crescente sucesso da utilização do processo de retificação é devido, em grande parte, ao emprego de rebolos com grãos abrasivos de CBN [0101, 0, 05]. Devido às suas características mecânicas, o CBN é classificado como um superabrasivo [[0101, 06, 07]. Este material, em comparação aos demais empregados como abrasivos, apresenta custos relativamente altos. Os resultados de maior produtividade obtidos com o seu emprego, no entanto, justificam tais gastos adicionais [08[08, 09, 10].

Os rebolos de CBN devem ter a sua geometria e o seu grau de afiação reconicionados, quando novos ou na frequência que se mostrar necessária, durante toda a sua vida. Este processo de preparação e/ou reparação das condições de corte de



um rebolo é denominado condicionamento, processo o qual é fortemente influenciado pela qualidade do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo da máquina-ferramenta.

Os rebolos são constituídos por três partes básicas: os grãos abrasivos, o ligante, e os poros. Cada parte apresenta grande influência sobre as características mecânicas e de corte da ferramenta [01].

Na fabricação de rebolos são empregados ligantes do tipo cerâmico-vítreos, metálicos e resinóides, sendo que mais da metade de todos os rebolos fabricados é composta por ligantes cerâmico-vítreos [01, 08, 09]. Estes, por sua vez, são empregados tipicamente para altas taxas de remoção e para a fabricação de componentes com elevada exatidão dimensional [10]. Cada rebolo de CBN pode custar mais de U\$ 10.000,00.

A obtenção dos benefícios na utilização de rebolos de CBN com ligantes cerâmico-vítreos está relacionada à execução de uma operação eficiente de condicionamento [01, 03, 08], a qual é dependente de uma boa qualidade do sistema de posicionamento do carro porta rebolo da retificadora.

### ***1.1. Definição do problema***

O processo de condicionamento de rebolos envolve as operações de perfilamento, de afiação e de limpeza. O dressamento é a operação de condicionamento realizada em rebolos cerâmico-vítreos na qual o perfilamento e a afiação são realizadas simultaneamente. Rebolos fabricados com ligantes resinóides não apresentam porosidade intrínseca ao seu processo de fabricação. Nestes rebolos, o processo de perfilamento antecede a etapa de afiação [09].

As ferramentas diamantadas empregadas no processo de condicionamento de rebolos cerâmico-vítreos são consideradas acionadas ou ativas, por apresentarem movimento rotativo. Elas estão comercialmente disponíveis no formato de discos e de rolos [01, 04, 09] e podem custar mais de U\$ 1.000,00 cada.

O desgaste total em ferramentas de dressamento ativas é composto pelo desgaste radial e pelo desgaste de quina. Para os discos dressadores, em decorrência de sua limitada largura, o desgaste de quina se sobrepõe ao desgaste radial. Este desgaste é

influenciado de modo significativo pelos seguintes parâmetros de entrada de processo [01]:

- Grau de recobrimento no dressamento –  $U_d$ ;
- Relação de velocidades no dressamento –  $q_d$ ; e
- Profundidade de penetração no dressamento,  $a_{ed}$ .

O desgaste do disco dressador se reflete em uma variação de dimensão real do rebolo em relação à dimensão desejada após o dressamento e isto requer um reposicionamento do rebolo após a medição do diâmetro da peça. Esta correção é efetuada automaticamente se um sistema de medição do diâmetro da peça em tempo real estiver instalado na máquina-ferramenta. Estes sistemas são caros e são individualmente projetados e instalados para cada grandeza radial e axial a ser verificada na peça.

O pequeno desgaste dos rebolos cerâmico-vítreos de CBN e as pequenas variações dimensionais verificadas nos discos dressadores no dressamento destes rebolos permitem a fabricação de um número grande de peças dentro de faixas de tolerância estreitas, tornando os sistemas de medição em tempo real subutilizados.

Conhecendo-se a influência dos parâmetros variáveis do dressamento com disco ativo sobre os resultados de trabalho na retificação com rebolos de CBN, torna-se possível prever a variação dimensional da peça e corrigir este erro pelo reposicionamento adequado do rebolo [08, 11, 12].

## 1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade da medição do erro de posicionamento do carro porta-rebolo de uma retificadora Flexa 600-L, através da aplicação do sistema de medição de posicionamento intrínseco da retificadora, em posições previamente definidas, reconhecidas por emissão acústica provocada pelo contato do disco dressador com uma superfície de referência montada na estrutura da máquina-ferramenta.

Para tal avaliação, são também realizadas medições do erro de posicionamento do carro porta rebolo na direção transversal da máquina, com um sistema baseado em interferometria óptica. Os resultados destas medições são tomados como padrão para

comparação com os resultados obtidos pela aplicação do sistema de medição por emissão acústica.

O sistema baseado em sinais de emissão acústica e o sistema baseado no uso de LASER são designados pelas siglas SISEA e SISLASER, respectivamente.

### **1.2.1. Objetivo específico**

Comparação dos resultados da medição do erro de posicionamento do carro porta-rebolo medido com o SISLASER, baseado em interferometria óptica, com os resultados obtidos com SISEA, auxiliado por sensores de EA, e pelo sistema de medição intrínseco de posicionamento do carro porta-rebolo da retificadora Flexa 600-L.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Usinagem com ferramentas de geometria não definida

Os processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida estão especificados na norma alemã DIN 8589 [01][01, 09]. O grupo é formado pelos processos de retificação, brunimento, lapidação, tamboreamento e jateamento, como mostra a Figura 2.1.

Tais processos apresentam em comum, o fato da remoção de material se dar pela ação de pequenos grãos abrasivos ativos que apresentam geometria aleatória e são postos em interferência com o material da peça. Tais grãos podem apresentar posição fixa em relação uns aos outros, como no caso da retificação e do brunimento, ou estarem suspensos em um meio, como ocorre na lapidação e no jateamento abrasivo. Podem ainda se deslocar numa trajetória pré-estabelecida – retificação, serem pressionados por uma força constante contra a peça – brunimento, serem limitados por uma superfície de referência – lapidação, ou ainda, penetrarem na peça munidos de certa energia cinética – jateamento abrasivo [01].

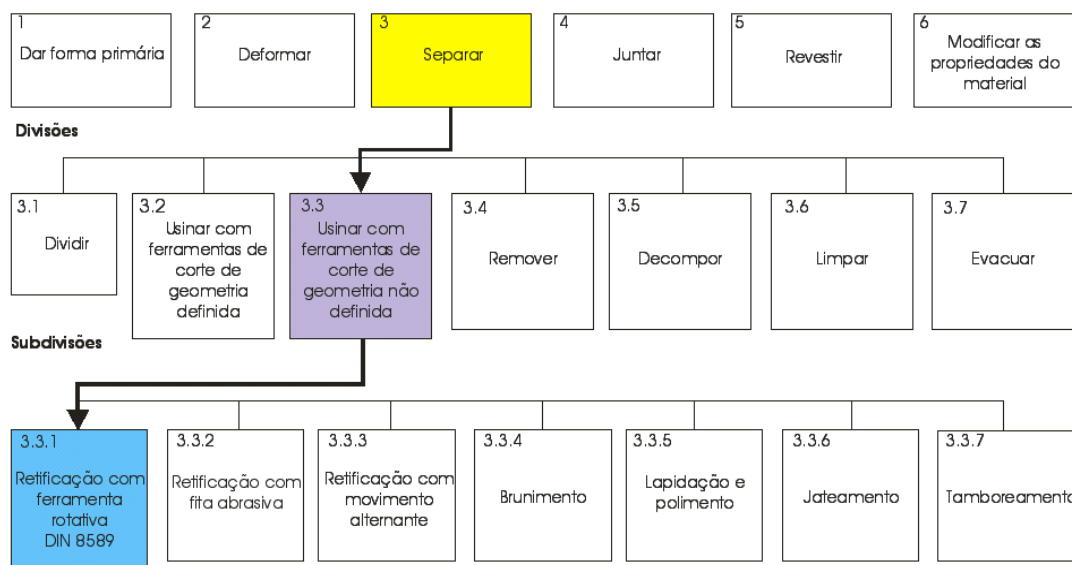


Figura 2.1 – Processos de fabricação segundo a DIN 8589 [09]

Dentre os processos citados, a retificação é o que apresenta mais emprego na indústria. Neste tipo de operação, a peça entra em contato com a ferramenta quando

esta gira a altas velocidades em torno do seu eixo axial [13, 14, 15]. As ferramentas de corte características deste tipo de operação são denominadas rebolos.

### 2.1.1. O processo de retificação

Na retificação, a peça de trabalho é colocada em contato com a ferramenta, enquanto esta gira, sendo que a peça pode apresentar ou não, movimento próprio de rotação ou translação. Deste modo, dispõem-se de um número significativo de possíveis métodos de retificação. A norma alemã DIN 8589, parte 11 classifica seis possíveis variações do processo de retificação [09]:

- Retificação plana;
- Retificação cilíndrica;
- Retificação de rosca;
- Retificação de geração de perfil guia;
- Retificação de geração de perfil;
- Cópia de perfil por retificação.

O aumento das exigências em termos de qualidade e precisão é uma propensão geral, que pode ser observada nos processos de manufatura. A retificação, como um processo de acabamento, é de relevante importância prática no que concerne esta tendência [01, 02, 03].

A retificação é empregada, via de regra, quando as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça e a qualidade de superfície exigida são altas, e o material usinado é demasiado duro para a usinagem convencional.

O processo também é empregado em operações de corte e na limpeza de superfícies. Algumas variantes do processo de retificação são configuradas de tal modo, que possibilitam altas taxas de remoção visando à obtenção de formas – o que tradicionalmente é realizado em operações com ferramentas de geometria definida [15, 16].

Devido à grande dureza dos grãos abrasivos, a retificação é aplicada principalmente no acabamento de peças metálicas, sendo que o processo também pode ser empregado na usinagem de plásticos, vidros, cerâmicas e pedras [15].

Com o intuito de se alcançar um resultado de trabalho adequado, tanto sob o ponto de vista tecnológico quanto econômico, é imprescindível que se tenha conhecimento das relações que envolvem o processo.

A retificação como processo de fabricação deve ser analisada em função das grandezas de entrada, características de processo e resultados de trabalho. As grandezas de entrada são divididas em grandezas do sistema e variáveis conforme mostrado na Figura 2.2 [03].

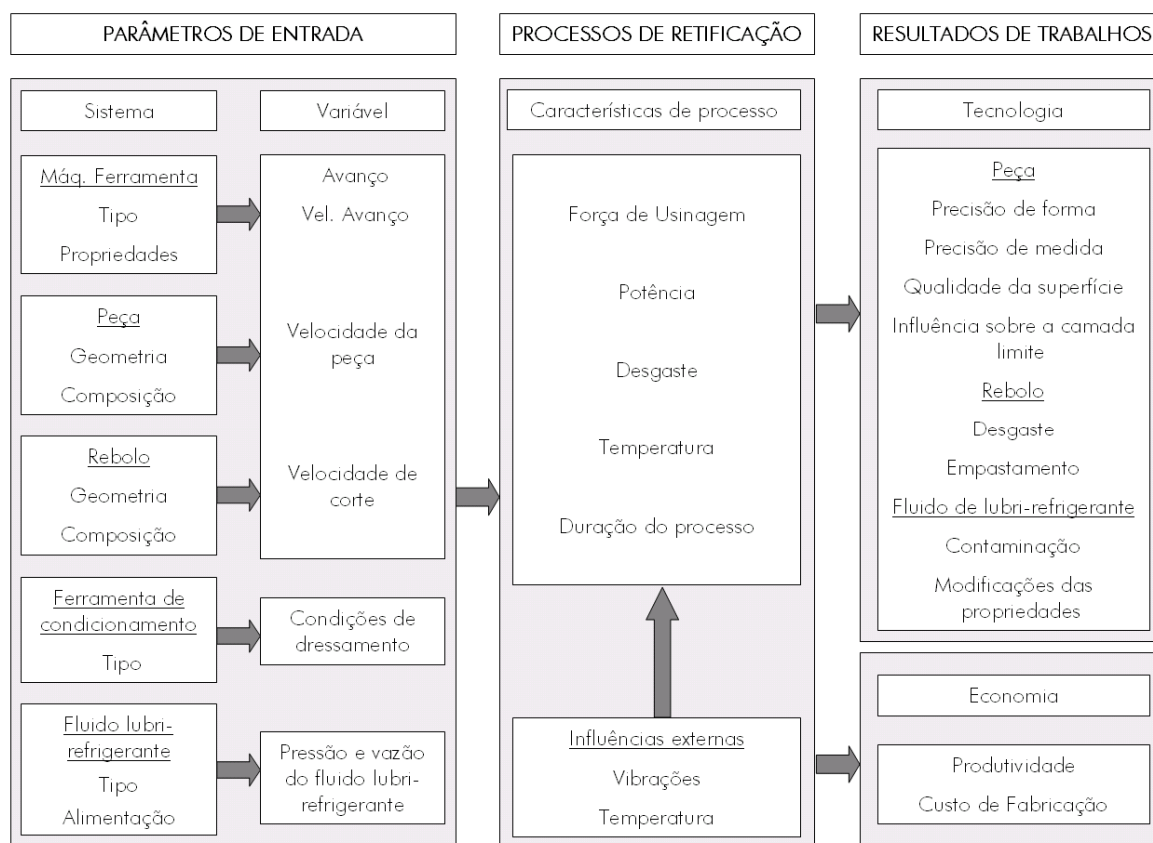


Figura 2.2 – Relação entre grandezas de entrada e resultado na retificação[03]

Como grandeza do sistema, tem-se a máquina-ferramenta, a peça, o rebolo, a ferramenta de dressamento e o sistema lubrificante. As variáveis são analisadas distintamente quando da retificação e do dressamento, bem como da influência do fluido lubrificante.

A caracterização do processo é feita pela força de retificação, pela potência consumida, o desgaste do rebolo, a temperatura, a emissão acústica e a duração do processo, devendo ser sempre consideradas as influências externas sobre o processo.

O resultado de trabalho é verificado pelas características macro e micro geométricas do componente, a influência térmica sobre o mesmo, bem como pelo consumo do rebolo e do fluido de corte, o que reflete assim, sobre a economia do processo.

### 2.1.2. Formação dos cavacos

A forma média do perfil da cunha de corte na retificação, mostrado na Figura 2.3, pode ser aproximada por um raio  $\rho_s$ . O quociente entre a espessura de usinagem ( $h_{cu}$ ) e o raio do gume é definido como grau de afiação ( $h_{cu}/\rho_s$ ) [02].

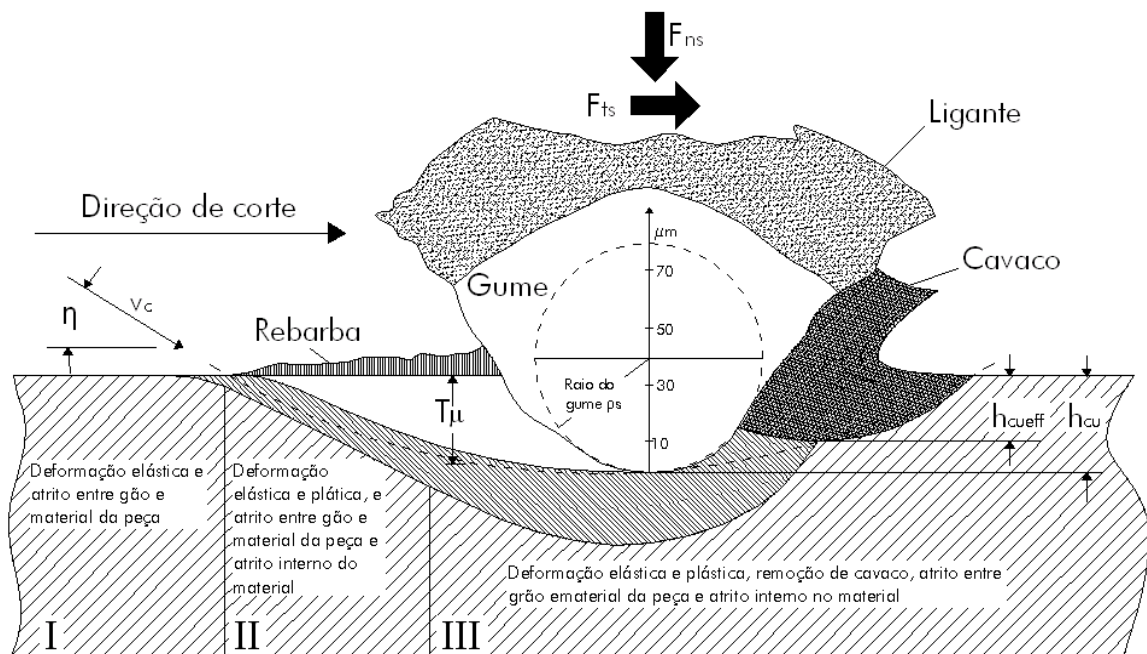


Figura 2.3 – Penetração de um gume abrasivo no início do corte na retificação [01]

Na retificação, devido às pequenas espessuras de usinagem, o grau de afiação do gume é pequeno, ao passo que na usinagem com ferramentas de corte de geometria definida o grau de afiação é elevado [02].

Na retificação, os gumes penetram na superfície da peça em uma trajetória quase plana, sendo o ângulo de ataque  $\eta$  também pequeno. Na região I ocorrem apenas deformações elásticas. Na região II, iniciam-se as deformações plásticas. Nesta região, o arredondamento do gume faz com que o ângulo de saída seja extremamente negativo o que leva a não produção de cavaco. O material é empurrado para os lados e formam-se rebarbas laterais [02]. Na região III, o gume penetra suficientemente na peça, a

espessura de usinagem ( $h_{cu}$ ) atinge a penetração de início de corte ( $T\mu$ ), iniciando a formação do cavaco [02].

### 2.1.3. Força de corte na retificação

Para a análise da dinâmica do processo de corte, pode-se decompor a força de retificação em duas componentes, conforme indicado na Figura 2.3: uma no sentido tangencial do corte ( $F_{ts}$ ) e outra no sentido normal do corte ( $F_{ns}$ ). O quociente  $F_{ns}/F_{ts}$  é denominado de relação de força de retificação [01].

Durante as fases I e II, a força normal é maior que a força tangencial e a relação de forças é grande, diminuindo à medida que avança para a fase III – Figura 2.3.

Gumes afiados, isto é, gumes com menor raio de gume –  $\rho_s$  –, favorecem o início da formação do cavaco, pois a força com que o gume tem que ser pressionado para dentro da peça para que seja atingida a penetração de início de corte é relativamente menor.

Gumes cegos, ou seja, com maior  $\rho_s$ , atuam no sentido de retardar o início da formação do cavaco. Além disso, em decorrência da superfície de contato aumentada, a força total de retificação é maior. Para pequenas espessuras de interferência, gumes cegos só atrim com a superfície da peça e o material é apenas deformado plasticamente, sem que haja formação de cavacos [01] – região II, Figura 2.3.

### 2.1.4. Distribuição de energia na retificação

Na usinagem com gumes de geometria não definida, os esforços singulares dos gumes na retificação são pequenos. Mas devido à pequena espessura de usinagem e à parcela significativa de deformações plásticas não associadas à formação de cavacos, ao atrito entre os gumes cegos e à superfície de corte, bem como devido à velocidade de corte elevada, a quantidade de calor gerada é de 8 a 10 vezes maior do que no processo de usinagem com ferramentas de corte com geometria definida. Esta quantidade de calor não pode mais ser transportada pelos cavacos e exige que o calor remanescente na peça seja removido pela aplicação de fluido lubri-refrigerante [01].

A Figura 2.4 mostra que a energia mecânica introduzida no processo é basicamente transformada em calor em quatro regiões. Em virtude da pouca afiação dos gumes, a maior parte da energia mecânica é transformada em calor pelo atrito no flanco dos grãos e pela deformação plástica do material da peça. Além disso, também se



transforma energia mecânica em calor na face dos grãos durante a remoção do cavaco. Uma parte da energia também é transformada em calor em decorrência do atrito do ligante com a superfície da peça.

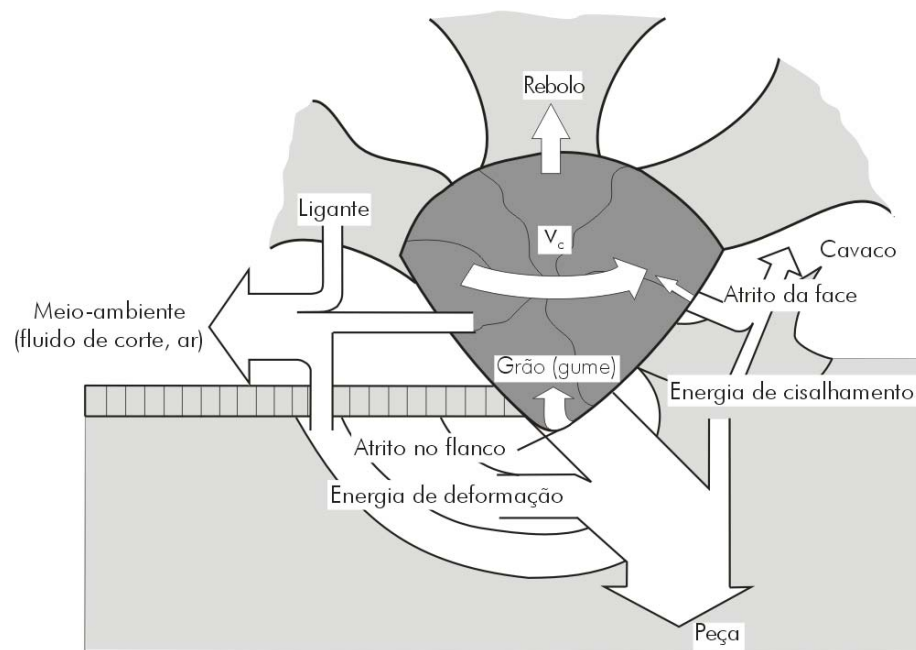


Figura 2.4 – Distribuição de energia na retificação [02]

Na usinagem com ferramentas de geometria definida, a maior parte do calor é transportada pelos cavacos. Já na usinagem com ferramentas de geometria não definida, a pouca afiação dos gumes e o ângulo de saída fortemente negativo fazem com que a maior parte do calor produzido pelo atrito e deformações plásticas seja conduzida para dentro da peça, provocando um aumento localizado de temperatura. Dependendo da ordem de grandeza e do tempo desse aumento, podem ocorrer mudanças na estrutura cristalina do material e fenômenos de oxidação da superfície da peça [02].

### 2.1.5. Cinemática do processo de retificação

A descrição dos fenômenos que ocorrem durante o processo de corte com ferramentas de geometria não definida é complexa. Isto se deve à natureza dos fenômenos básicos que dominam os processos de corte e ao grande número de gumes que atuam simultaneamente. A remoção de material se dá pela soma de fenômenos isolados de formação de cavacos [01].

Devido à distribuição aleatória dos gumes e de suas formas, são aplicados métodos estatísticos para analisar o mecanismo de corte na retificação [01, 10]. A espessura média do cavaco não deformado,  $h_{cu}$ , e o comprimento médio do cavaco,  $l_k$ , são empregados para descrever o formato do mesmo – Figura 2.5.

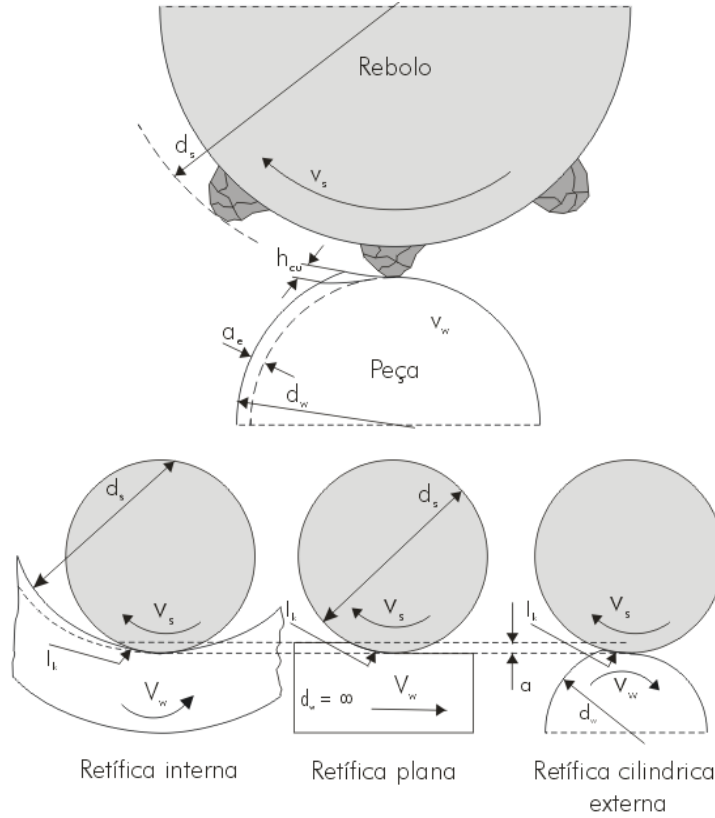


Figura 2.5 – Relação de  $h_{cu}$  com variáveis de entrada e as condições de contato [01]

A espessura do cavaco não deformado é dependente da densidade estática dos gumes,  $C_{stat}$ , e das variáveis geométricas e cinemáticas do processo, onde o  $v_w$  é a velocidade da peça,  $v_s$  é a velocidade de retificação,  $a_e$  é a profundidade de corte, e  $d_{se}$  é o diâmetro equivalente do rebole [01, 10]. Essa dependência é descrita pela função exponencial, expressa na Equação 2.1.

$$h_{cu} \cong k \cdot \left[ \frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \cdot \left[ \frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \cdot \left[ \frac{a_e}{d_{se}} \right]^\gamma \quad 2.1$$

Na Equação 2.1,  $k$  é um fator de proporcionalidade e os índices  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  são expoentes constantes experimentais, que assumem valores entre zero e um. O comprimento de contato  $l_k$ , indicado na Figura 2.5, é calculado a partir da Equação 2.2.

$$l_k = \sqrt{a \cdot d_{se}} \quad 2.2$$

Nas equações 2.1 e 2.2, o diâmetro equivalente  $d_{se}$  é um parâmetro que está relacionado às condições de contato entre rebolo e peça, indicando o diâmetro que o rebolo utilizado na retificação cilíndrica deveria ter para proporcionar a mesma geometria de corte quando utilizado na retificação plana. O diâmetro equivalente é dado pela Equação 2.3.

$$d_{se} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad 2.3$$

Na Equação 2.3, o sinal positivo é empregado para calcular o  $d_{se}$  na retificação cilíndrica externa –  $d_{se} < d_s$ . O sinal negativo, por sua vez, é utilizado para a retificação cilíndrica interna –  $d_{se} > d_s$ . Na retificação plana o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro do rebolo.

A Equação 2.1 mostra que um aumento na velocidade de corte, supondo o diâmetro equivalente e o número de gumes estáticos constantes, resultará em uma redução na espessura do cavaco não deformado. Um aumento da penetração passiva e da velocidade da peça aumenta a espessura de usinagem.

Um aumento da velocidade de corte leva a uma diminuição significativa do esforço sobre cada gume, conseqüência da diminuição da espessura de usinagem. A diminuição da espessura de usinagem não é linear com o aumento da velocidade de corte, porque o número de gumes cinemáticos diminui com a diminuição da espessura de usinagem. O aumento da velocidade de corte também influencia a espessura para a qual inicia a formação dos cavacos, reduzindo-a. Por outro lado, o calor e a temperatura gerados pelo atrito aumentam significativamente com o aumento da velocidade de corte, exigindo uma maior eficiência na lubrificação e refrigeração.

Os resultados experimentais mostram que se a velocidade de corte for dobrada, mantendo-se a mesma taxa de retificação de material, a força tangencial é reduzida, mas leva-se a um aumento na quantidade de trabalho realizada. Devido ao tempo de retificação constante, há um aumento de energia por peça no processo e, subseqüentemente, na energia térmica total gerada. Quando a taxa de retificação também é aumentada, a força tangencial crescente resulta em um conseqüente aumento da energia do processo de retificação. A quantidade de energia térmica introduzida na

peça é mais baixa do que na situação inicial, quando se aplica o mesmo volume usinado na peça, apesar da velocidade de corte e da taxa da remoção do metal mais elevadas [03].

Estas considerações mostram que a produtividade da usinagem pode ser aumentada usando-se alta velocidade de retificação sem ter que aceitar efeitos térmicos indesejáveis nos componentes retificados [01, 03].

A grandeza que caracteriza o tempo principal de fabricação de um processo é a taxa de remoção de material –  $Q_w$  – obtida pela relação entre o volume de material usinado na peça –  $V_w$  – e o tempo no qual se remove esse volume –  $t_c$  – conforme expresso na Equação 2.4 [02].

$$Q_w = \frac{V_w}{t_c} \quad 2.4$$

Para permitir uma comparação entre os resultados obtidos com diversas larguras efetivas de retificação, a taxa de retificação é dividida pela largura efetiva de retificação resultando em uma taxa de retificação específica –  $Q'_w$ . Dado ainda que o volume usinado específico –  $V'_w$  – expressa a razão entre  $V_w$  e  $b_D$ , chega-se à Equação 2.5 para o cálculo de  $Q'_w$ .

$$Q'_w = \frac{V'_w}{t_c} \quad 2.5$$

Um aumento de  $Q'_w$  leva a uma diminuição do tempo principal de usinagem. Não se pode concluir, no entanto, que um processo mais rápido seja também o mais econômico, pois o aumento da velocidade de remoção de material leva a um desgaste mais acelerado na ferramenta. Deste modo a fabricação teria que ser interrompida com maior frequência para condicionamento ou troca de ferramenta [01].

As vantagens obtidas pela redução do tempo principal de usinagem podem sim, ser eliminadas pelo aumento dos tempos secundários. Deve-se considerar ainda que a diminuição do tempo de fabricação frequentemente leva a resultados inferiores na qualidade do trabalho [02].

### 2.1.6. Desgaste dos rebolos

Nos processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida, os esforços sobre os gumes são consideravelmente maiores do que aqueles exercidos sobre

os gumes das ferramentas de geometria definida. Isto ocorre devido à geometria negativa da parte cortante de cada grão abrasivo. Devido a estes maiores esforços, ocorre um desgaste acentuado nestes grãos. Este desgaste é subdividido em macrodesgaste e microdesgaste – Figura 2.6 – [10].

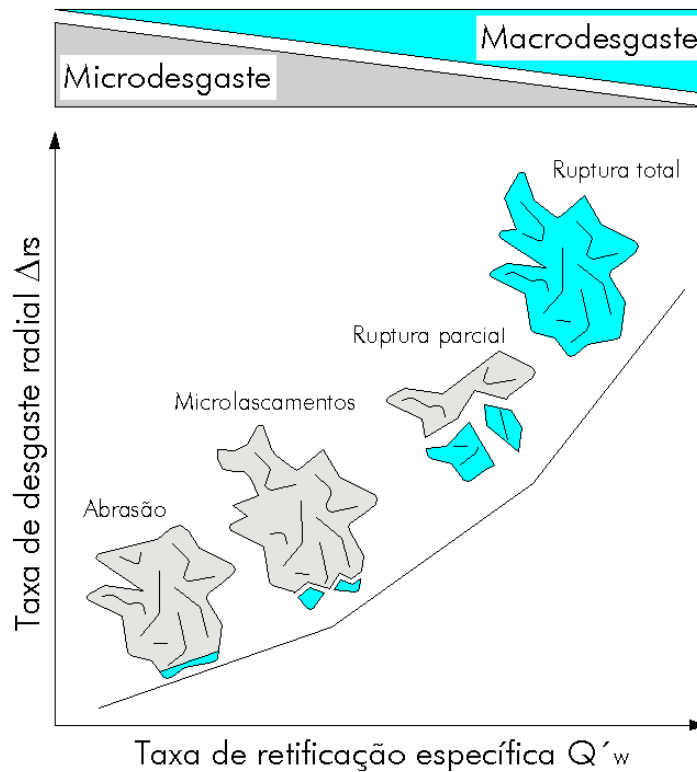


Figura 2.6 – Influência da taxa de retificação específica sobre a atuação dos mecanismos de desgaste [01]

A taxa de retificação específica –  $Q'_w$  – influencia os mecanismos que caracterizam o desgaste. Pequenos valores de  $Q'_w$  provocam mecanismos de desgaste abrasivo e microlascamentos, o que faz que a taxa de desgaste radial  $\Delta_{rs}$  também seja pequena – Figura 2.7. Com o aumento de  $Q'_w$ , as forças que atuam sobre os gumes aumentam e o desgaste passa a ocorrer principalmente em função da ruptura de pedaços maiores dos grãos, ou até mesmo do arrancamento de grãos inteiros do ligante, o que leva a uma maior taxa de desgaste radial [01].

Para taxas de retificação  $Q'_w$  pequenas, dominam os mecanismos de abrasão e microlascamentos, caracterizando o microdesgaste, com forte arredondamento dos gumes e conseqüente cegamento do rebolo. Para taxas de retificação  $Q'_w$  grandes, dominam o lascamento de gumes e o arrancamento de grãos para fora do ligante.

O desgaste total dos rebolos –  $\Delta_{sc}$  – é quantificado pelo desgaste radial –  $\Delta_{rs}$  – e pelo desgaste de quina –  $\Delta_{rsk}$ . Se o desgaste radial não é compensado por um sistema de medição adequado, ocorrem erros de medida na peça. O desgaste de quina não pode ser compensado e exerce grande influência sobre a precisão de forma da peça [02].

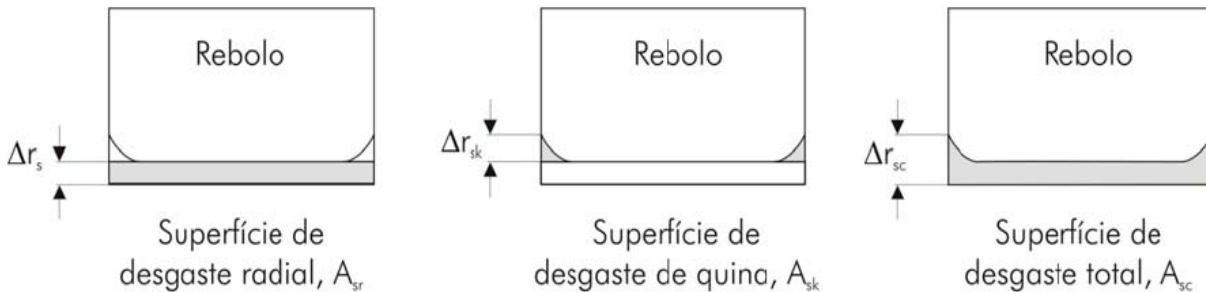


Figura 2.7 – Desgastes radial –  $\Delta_{rs}$  –, de quina –  $\Delta_{rsk}$  – e total –  $\Delta_{sc}$  [03].

O microdesgaste tem início nas superfícies cristalinas próximas à superfície externa do grão – Figura 2.8. Em tais superfícies, as elevadas temperaturas e pressões levam a fenômenos de oxidação e difusão. Caso haja grãos de CBN na composição do rebole, estes fenômenos podem ocorrer de forma menos acentuada, devido às suas elevadas condutibilidade térmica e dureza e às baixas energias e temperaturas geradas na retificação com rebolos de CBN, em comparação com rebolos de óxido de alumínio.

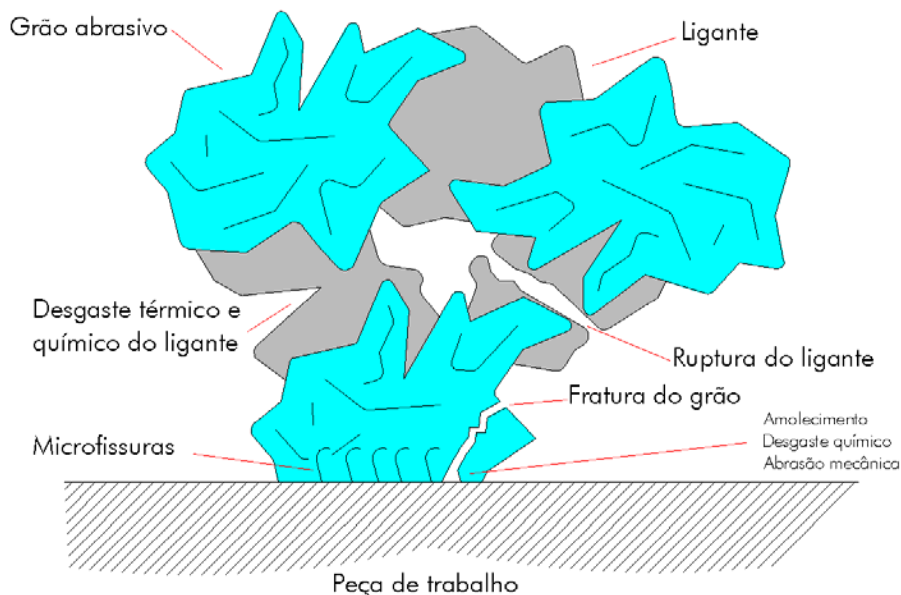


Figura 2.8 – Formas de desgaste do grão e do ligante [01].

A oxidação e a difusão reduzem a resistência abrasiva do grão, formando uma camada menos resistente à compressão. Tal camada é então removida por abrasão, o que resulta na exposição de novas camadas ao citado tipo de desgaste. Além disto, pela

ação térmica e mecânica alternada, é possível que ocorra fadiga em algumas regiões do abrasivo, o que gera fissuras. Tais fissuras podem ser propagadas e levar ao lascamento de pequenas partes do grão, ou também, a macrolascamentos de grandes partes do grão abrasivo [01].

O ligante, como elemento fundamental de ancoragem dos grãos, é afetado não apenas pela ação do atrito e pela compressão promovida pelos cavacos, mas também por reações termo-químicas com o fluido de lubri-refrigeração [01]. Quando este fluido é empregado na forma de emulsão de óleo em água na retificação com CBN, os grãos aquecidos entram em contato com o vapor d'água gerado, criando um ambiente propício à formação de reações químicas. Os cantos vivos dos grãos de CBN são especialmente afetados pela reação do vapor com o CBN, formando ácido bórico e amônia [01].

## 2.2. Ferramentas de corte empregadas na retificação

Os rebolos são ferramentas rotativas fabricadas em diversos formatos. A FEPA – do Inglês *Federation of European Producers of Abrasives* – faz uma classificação segundo a seção transversal dos rebolos – Anexo 1 – a qual é adotada neste trabalho [15, 17].

Em função da aplicação e abrasivo empregados, os rebolos são integralmente de material abrasivo ligado ou constituídos de uma camada de material abrasivo ligado aplicado sobre um disco de suporte – Figura 2.9.

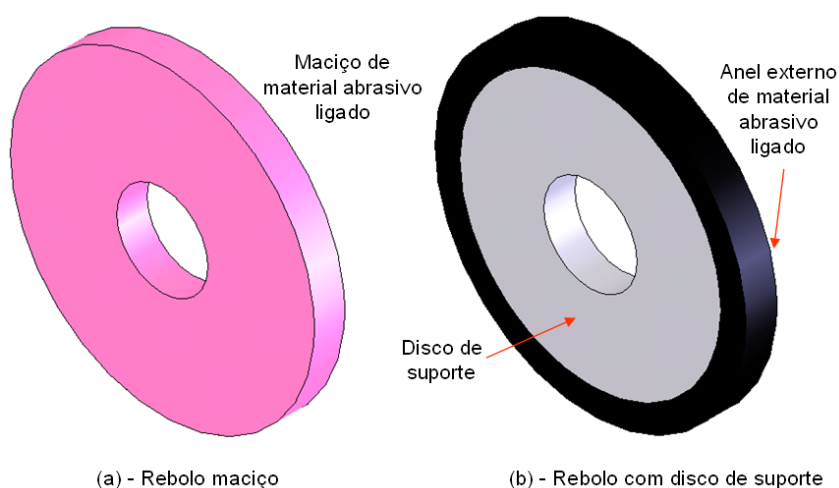


Figura 2.9 – Rebolos maciços (a) e não maciços (b).

Este disco tem como funções básicas o suporte do abrasivo ligado e a transmissão do torque de acionamento. Ele pode ser constituído de materiais compósitos ou de metais. Possíveis materiais compósitos são as resinas, como a baquelita, reforçada com fibra de vidro, Óxido de Alumínio –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – ou outras cargas. Com relação aos metais, podem ser usados o aço, o Alumínio e outros.

O disco de suporte proporciona ainda economia de material abrasivo e contribui para a melhoria das características dinâmicas do sistema, aumentando a sua tenacidade e auxiliando na absorção de impactos.

O material abrasivo ligado é composto por três partes básicas: grãos abrasivos, poros ou vazios e material ligante ou de preenchimento. Na Figura 2.10, o material abrasivo mostrado é o Óxido de Alumínio e o ligante, do tipo cerâmico-vítreo.

Cada uma destas partes exerce influência significativa nas propriedades características da ferramenta de corte como um todo, e por isto a sua seleção deve ser feita de acordo com as solicitações a que se destina o rebolo [01, 09, 15].

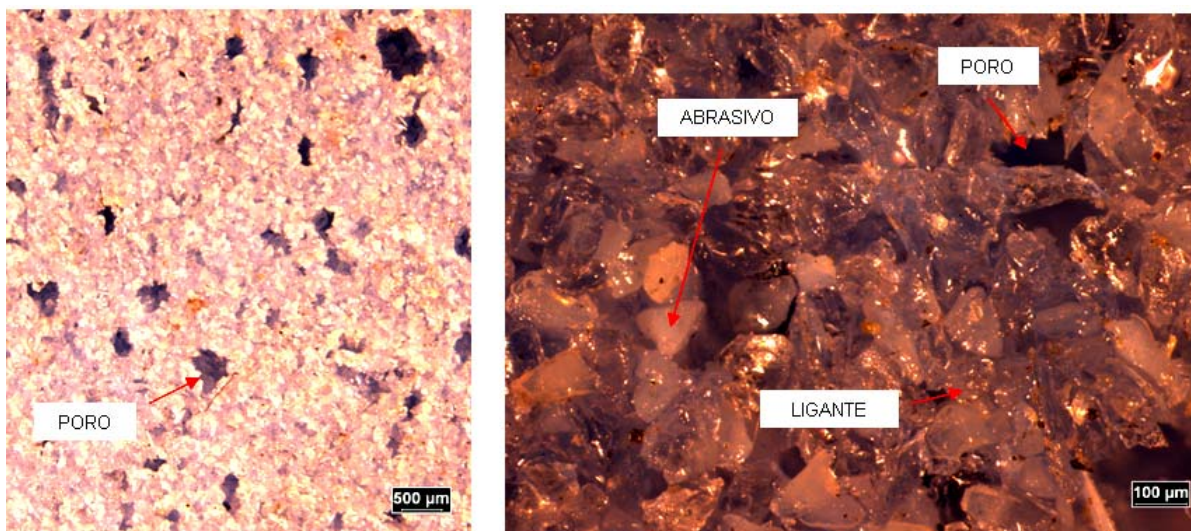


Figura 2.10 – Componentes volumétricas de um rebolo.

Cada rebolo assume uma macro-geometria característica, como mostra a Figura 2.11, na qual se pode ver uma seção de um rebolo. A linha fina contínua mostrada no detalhe indica a macro-geometria do rebolo e não coincide, necessariamente, com o perfil real da ferramenta. O perfil real é irregular e leva em conta as saliências oriundas dos grãos abrasivos na superfície do rebolo, que excedem a linha que limita a macro-geometria, assim como as reentrâncias, aquém desta linha. Classificações de rebolos



segundo a sua geometria, como mostrado no Anexo 1, são feitas levando-se em consideração a macro-geometria.

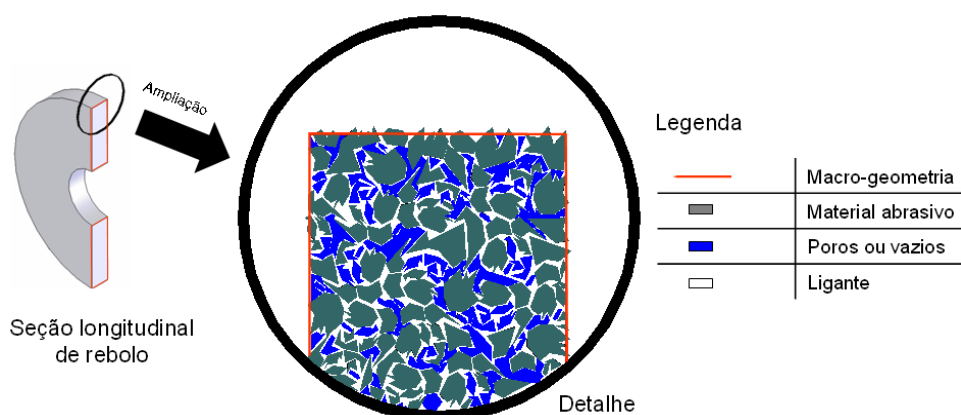


Figura 2.11 – Seção de um rebolo.

Os grãos e os poros apresentam posições fixas em relação uns aos outros e apresentam a função de corte e transporte de cavaco e de fluido lubri-refrigerante, respectivamente. Este transporte, por sua vez, é realizado de e para a região de corte, que é a região de contato imediato entre rebolo e peça durante o processo de usinagem. O ligante preenche os espaços entre os grãos abrasivos e contém os poros. Também cabe ao ligante a função de manter os grãos coesos à ferramenta durante o processo de corte [01].

### 2.2.1. Materiais abrasivos

As características necessárias do material abrasivo são: elevada dureza, elevadas estabilidades térmica e química e elevada tenacidade. Como não existe um material que satisfaça total e simultaneamente essas exigências, deve-se escolher o material de acordo com a aplicação [01, 02, 09].

Existem materiais abrasivos naturais e sintéticos. Os naturais são: o quartzo, a granada, o esmeril, o coríndon e o diamante natural. Salvo o diamante, em aplicações industriais, os naturais apresentam importância secundária como materiais abrasivos no processo de retificação. Os materiais abrasivos sintéticos, usados na fabricação de rebolos são: o coríndon, o Carboneto de Silício – SiC, o diamante sintético e Nitreto de Boro Cúbico – CBN.

O CBN e o diamante são classificados como materiais superabrasivos devido a suas características físico-químicas e os rebolos fabricados com estes abrasivos são

chamados de rebolos superabrasivos. Algumas informações relevantes para uma melhor compreensão deste trabalho, relativas aos superabrasivos são descritas a seguir [01, 02, 17].

### **CBN - Aspectos tecnológicos e econômicos**

A sintetização do Nitreto de Boro Cúbico, comercialmente designado CBN – do Inglês *Cubic Boron Nitride* – foi obtida pela primeira vez em 1957, mas somente a partir de 1968, ele passou a ter aplicação industrial como material abrasivo. Sua obtenção possibilitou a retificação de aços endurecidos.

O CBN é sintetizado a partir do Nitreto de Boro Hexagonal, um pó com propriedades semelhantes às da grafita – lubrificante sólido –, mediante aplicação de elevadas pressões e temperaturas na presença de um catalisador. Esta substância sintética, nas condições normais de temperatura e pressão, apresenta altíssimas dureza –  $K_{100} = 4700$  – e condutividade térmica. Nestas condições, a dureza do CBN é a segunda maior conhecida, sendo inferior somente à do diamante.

A Figura 2.12 mostra o comportamento da microdureza de quatro abrasivos empregados na fabricação de rebolos. Embora o diamante apresente a maior dureza para a temperatura ambiente, com o aumento da temperatura, a dureza diminui de forma mais acentuada que a do CBN. A partir de 750 °C a dureza do diamante é inferior a do CBN, sendo que em aproximadamente 800 °C tem início a sua grafitização. O CBN, para a temperatura de 1100 °C apresenta uma microdureza três vezes superior a dos abrasivos convencionais  $Al_2O_3$  e SiC [18, 19, 20].

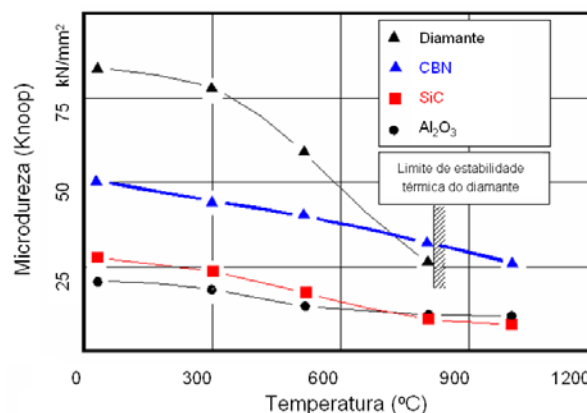


Figura 2.12 – Efeito da temperatura nos diferentes materiais de grãos abrasivos [01]

O CBN, em condições normais de pressão, é estável em relação ao Oxigênio até 1300°C, pois uma camada protetora de Óxido de Boro –  $B_2O_3$  impede a progressão da oxidação. No entanto, na presença de vapor d'água superaquecido o CBN, é atacado e desintegrado pela formação de Ácido Bórico e Amoníaco. Esta reação favorece o desgaste dos grãos nas regiões mais aquecidas, levando ao cegamento dos gumes.

Dados os custos com ferramental quando se faz uso de rebolos de CBN e visando a eliminação ou minimização de impactos ambientais, deve-se dar a devida atenção aos parâmetros de processo para que a citada reação química não ocorra durante as operações de retificação.

Os grãos de CBN apresentam forma irregular e estão comercialmente disponíveis em duas qualidades básicas. Uma com recobrimento de 60%, em peso, de níquel, recomendada especialmente para ferramentas com ligante resínóide, para moderar a condução de calor para o ligante.

A outra, sem recobrimento, é utilizada em ferramentas de ligante cerâmico-vítreo e de ligante metálico. Os grãos podem ainda ser mono-cristalinos ou poli-microcristalinos. A Tabela 2.1 resume características de desgaste e estruturais e aplicações referentes a estas classificações [20].

Tabela 2.1 – Caracterização dos grãos de CBN de acordo com a sua estrutura.

Tipo de grão	Aplicações	Desgaste	Estrutura	Obs.
Mono-cristalino de média tenacidade	Aplicações gerais com pequenas a médias taxas de retificação	Depende de um desgaste por macrolascamentos para gerar gumes afiados	Forma de blocos	Oferecidos em maior número de especificações.
Mono-cristalino de alta tenacidade	Aplicações mais severas			
Poli-microcristalino	Adequado para condições bastante severas de retificação	Desgaste abrasivo por e perda de cristais individuais e geração de gumes afiados	Irregular	Constituído por pequenos cristais de 1 $\mu m$ sinterizados. O tipo de desgaste contribui para que a força de retificação permaneça estável.

Atualmente, a retificação com CBN é usada principalmente para a usinagem de aço-ferramenta e aplicada mais extensivamente a outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas. Recentemente rebolos de CBN com ligante cerâmico-vítreo vêm sendo empregados com sucesso na retificação de ferro fundido.

Com relação aos abrasivos convencionais, as vantagens do CBN estão, sobretudo, na maior capacidade de retificação de aços de difícil usinagem, com elevada percentagem de elementos de liga [01, 09].

### *Diamante – Aspectos tecnológicos e econômicos*

O diamante é a forma alotrópica cristalina do Carbono, com uma estrutura cúbica compacta na forma tetraédrica, a qual apresenta fortes ligações entre os seus cristais. Tal forma cristalina é instável e passa espontaneamente para a forma hexagonal – grafita – quando submetido a temperaturas elevadas [01].

Sua mais notável propriedade é a extrema dureza à temperatura e pressão ambiente, que se situa entre 5000 e 7000 Knoop, dependendo da orientação do cristal. Tal dureza, nas CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão –, é superior a de qualquer outro material natural conhecido [21].

Além do diamante natural existe também o diamante sintético. O diamante empregado na fabricação de rebolos pode ser natural ou sintético e é empregado para a retificação de materiais frágeis e quebradiços tais como metal duro, quartzo, cristal, pedras preciosas, mármore, granito e materiais cerâmicos. Em alguns casos, o diamante pode também oferecer vantagens econômicas na usinagem de aços e ferros fundidos [01, 09].

A Figura 2.13 mostra um gráfico comparativo, para o estado de temperatura e pressão ambientes normais, da dureza Knoop dos materiais sintéticos mais comumente utilizados para a fabricação de ferramentas de geometria não-definida [22].

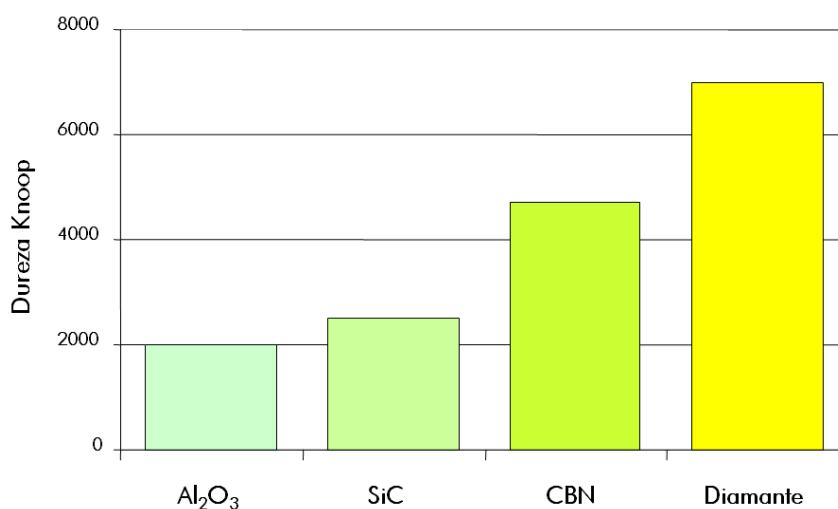


Figura 2.13 – Dureza Knoop para diferentes materiais de grãos abrasivos [22]

A condutividade térmica elevada é outra forte característica do diamante. Dela decorre a necessidade de revestimento do diamante com metal para a fabricação de rebolos resinóides. O metal funciona como uma barreira térmica. O emprego de níquel, cobalto ou ligas metálicas implica numa redução da dissipação do calor para o ligante, o que aumenta a resistência de ligação entre este e o grão abrasivo. O emprego de diamantes revestidos e com configurações cristalinas controladas tornou possível a aplicação desse abrasivo para retificação de não ferrosos dúcteis [13].

### 2.2.2. Ligantes

Para se conseguir um bom rendimento do rebolo, este deve estar constantemente afiado e possuir capacidade de absorver um volume elevado de cavacos. O rebolo deve ser poroso e deve poder suportar as cargas elevadas da retificação que são aplicadas nos grãos abrasivos e nas pontes de ligante que seguram os grãos [01].

O ligante é o responsável pela transmissão da força motriz ao local de ação do grão abrasivo. Nos rebolos cerâmico-vítreos, além da quantidade de ligante, também a natureza da ligação entre o grão e o ligante definem as características de desgaste do rebolo [02].

A porosidade do rebolo cerâmico-vítreo pode ser ajustada sobre uma larga escala, variando-se a formulação e o processo de fabricação do rebolo. Como a estrutura de um ligante cerâmico-vítreo é aberta, o condicionamento se resume a um dressamento, no qual a afiação é simplificada ou mesmo, eliminada [01].

### 2.2.3. Dureza e estrutura do rebolo

A dureza de um rebolo é caracterizada pela resistência que a ele oferece à remoção dos grãos abrasivos. Esta propriedade é função do tipo do ligante, do material abrasivo, e da estrutura do rebolo [01].

A estrutura do rebolo denota a sua composição volumétrica em termos do percentual de grãos, ligante e poros, e de sua distribuição. O volume total de um rebolo –  $V$  – pode ser expresso como a soma das parcelas volume de grãos –  $V_K$  –, volume do ligante –  $V_B$  – e volume de poros –  $V_P$  –, como expressa a Equação 2.6.

$$V = V_K + V_B + V_P \quad 2.6$$

### 2.3. Condicionamento de rebolos

As ferramentas de retificação, quando novas ou após certo tempo de uso, encontram-se em uma condição “não adequada” à usinagem. Por isto, devem ser preparadas na periodicidade que se mostrar necessária, para manterem as suas características de corte.

Os problemas apresentados pelos rebolos devido ao uso podem ser assim classificados [01]:

- Capacidade de corte reduzida devido ao cegamento dos gumes;
- Entupimento dos poros com cavacos; e
- Perda o seu perfil geométrico.

Estas mudanças das características da topografia do rebolo influenciam [01, 03, 09]:

- O transporte de fluido lubri-refrigerante para a região de corte,
- A magnitude da força de retificação,
- A quantidade de calor gerado no processo,
- A qualidade e integridade da superfície retificada.

Os procedimentos de preparação ou manutenção das ferramentas de corte de geometria não definida é denominada “condicionamento”, o que abrange as operações de perfilamento, afiação ou avivamento e limpeza do rebolo [01].

O condicionamento influencia significativamente no rendimento do rebolo. Na produção de séries grandes, o condicionamento é realizado de modo a possibilitar a melhor adaptação do rebolo às exigências do processo.

Em séries médias e pequenas é importante que o condicionamento garanta as características do rebolo, o que objetiva possibilitar a usinagem de peças com diferentes perfis, materiais e/ou com acabamentos diferentes [16].

A Figura 2.14 mostra a classificação dos processos envolvidos no condicionamento e a sua dependência em relação ao tipo de ligante empregado na fabricação do rebolo.

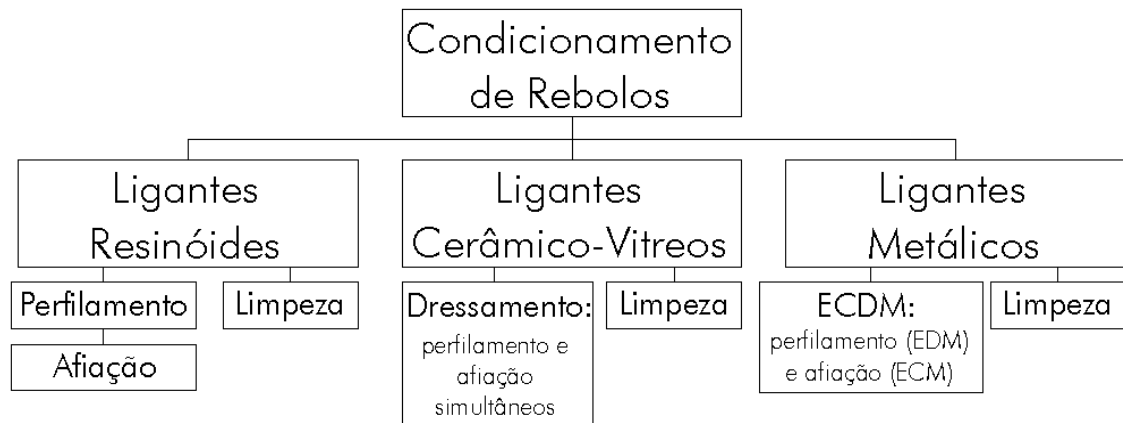


Figura 2.14 – Classificação dos processos de condicionamento de rebolos.

### 2.3.1. Perfilamento

Trata-se de uma operação que visa conferir forma geométrica ao rebolo e que não depende do tipo de ligante empregado no mesmo. O perfilamento trabalha apenas a macro geometria do rebolo – Figura 2.11.

### 2.3.2. Afição

Corresponde à operação de condicionamento que visa o aumento da protusão dos grãos abrasivos através da remoção de uma determinada quantidade de ligante entre os grãos da periferia radial do rebolo – Stuckenholtz *apud* Leme [04].

### 2.3.3. Limpeza

A operação de limpeza visa a remoção de resíduos dos poros da ferramenta – restos de cavacos e partículas aderidas à superfície. É realizada com auxílio de escovas de aço e jatos de ar comprimido.

### 2.3.4. Dressamento

Nesta operação, a afiação e o perfilamento são realizados de modo simultâneo. Ela é característica dos rebolos cerâmico-vitreos. Após o dressamento, o rebolo já está pronto para ser levado ao uso.

### 2.3.5. ECDM – Usinagem por descargas eletroquímicas

O processo ECDM – do Inglês *Electro Chemical Discharge Machining* – é um processo de descarga elétrica em um dielétrico levemente condutor de eletricidade. Neste

processo, ao se aplicar a diferença de potencial entre os eletrodos, o rebolo, em polaridade anódica, sofre uma remoção de material pela dissolução anódica do ligante [23].

As fases do ECM do novo processo de dressamento permitem gerar uma saliência entre 75% e 100% do diâmetro médio dos grãos. Na Figura 2.15 é mostrada a microtopografia de um rebolo de diamante com ligante metálico após o dressamento convencional e a ECDM. A Figura 2.15(a) mostra a topografia com os sulcos resultantes do processo convencional de afiação. A topografia mostrada na Figura 2.15(b) foi obtida pelo processo ECDM.

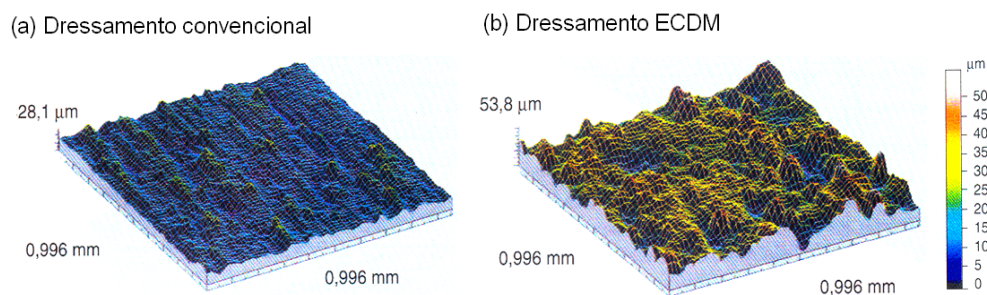


Figura 2.15 – Rebolo metálico afiado por processo convencional (a) e por ECDM (b) [23].

### 2.3.6. Dressadores para rebolos cerâmicos vítreos e resinóides

Para se proceder a remoção de material de rebolos cerâmico-vítreos e resinóides no perfilamento, é necessário o emprego de ferramentas fabricadas com material abrasivo mais duro que o material abrasivo do rebolo que está sendo condicionado. Em decorrência disto, são empregadas ferramentas de diamante, as quais podem ser fixas ou rotativas. Na Figura 2.16 são mostrados de forma esquemática os quatro princípios básicos de dressamento com dressador fixo e com dressador rotativo [24].

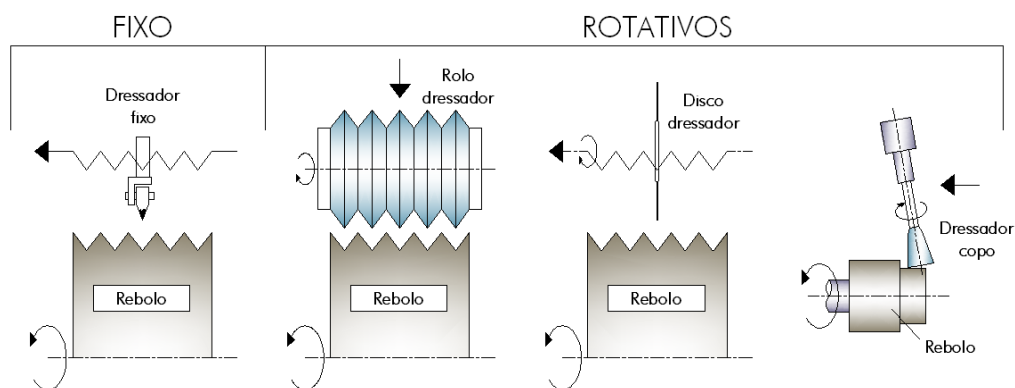


Figura 2.16 – As formas de dressamento mais usuais [24].



### *Dressadores fixos*

Comercialmente, o termo “dressador” é utilizado para designar as ferramentas empregadas nas operações de dressamento de rebolos. Para rebolos convencionais, tais ferramentas, em geral, são fixas e a sua parte ativa consiste de um ou mais diamantes embutidos em uma matriz metálica.

A ação dos dressadores fixos – Figura 2.17 – consiste em percorrer o perfil do rebolo no sentido axial, num movimento similar ao da ferramenta processo de torneamento. Tal movimento axial é feito com velocidade de avanço axial constante –  $v_{fad}$ . O número de passes no dressamento é função do erro de forma que deve ser corrigido, com profundidade de dressamento –  $a_{ed}$  – específica para cada tipo de rebolo. Na obtenção de perfis, a trajetória da ferramenta é comandada numericamente ou auxiliada por uma régua copiadora.



Figura 2.17 – Ferramentas de perfilar estáticas [25]

Dentre as ferramentas estáticas mais importantes, cita-se as de ponta única, ponta única perfilada, as múltiplas com distribuição linear – *Fliese* – e as de distribuição aleatória – multiponta.

Para que um dressador de ponta única possa ser empregado no perfilamento de um rebolo com geometria diferente da cilíndrica, a geometria do dressador deve ser conhecida.

Dressadores fixos apenas permitem dressar geometrias simples, como rebolos cilíndricos, planos e composições destes – perfis 1A1, 2, 6 e 52 do Anexo 1. O dressamento de perfis é limitado e exige-se que se tenha o conhecimento da geometria do perfil do dressador [26, 27].

Ferramentas estáticas são pouco empregadas para rebolos superabrasivos. Para estes rebolos é mais adequado o emprego de ferramentas acionadas – Figura 2.16. Os dressadores diamantados rotativos apresentam um desgaste menos acentuado do que o observado nos dressadores fixos.

### ***Dressadores acionados***

De acordo com Meyer *apud* Morales [05], as ferramentas para perfilar acionadas, as quais são de emprego mais recente do que as estáticas, foram introduzidas no processo de retificação devido aos seguintes fatores:

- Aumento das exigências relativas à precisão dimensional e geométrica das peças retificadas;
- Incremento em requerimentos da vida das ferramentas para perfilar;
- Aumento da produtividade;
- Redução do custo de perfilamento por peça;
- Introdução da tecnologia CNC, para retificação e condicionamento do rebolo;
- Elevados requerimentos de repetitividade em manufatura de precisão;
- Incremento no uso de rebolos de CBN na produção em série;

Quando o rolo dressador é mergulhado contra o rebolo, este passa a apresentar o perfil recíproco ao da peça. O tempo de dressamento é curto. Cada dressador é feito especialmente para uma determinada peça, sendo restrito aos processos para a fabricação seriada [01]. Aplicações típicas são o dressamento de rebolos para a retificação de válvulas de motores à combustão interna, engastes de pás de turbinas de avião, na retificação de dentes de serra, canais de brocas e de machos de rosquear [26].

Os discos dressadores são mais apropriados para a fabricação flexível, já que esse tipo de dressador não é dependente do perfil da peça. O perfil desejado é gerado através do comando numérico da retificadora. Os discos dressadores permitem atingir um grau de acabamento não possível de se atingir com os rolos dressadores [27]. Os rebolos condicionados com discos dressadores são empregados para a fabricação de eixos comando de válvula, virabrequins, dentes de engrenagem e roscas sem fim [28].

Os dressadores no formato de disco apresentam uma pequena espessura e têm sua matriz fabricada com uma liga metálica ou em metal duro sinterizado. Os diamantes dos discos dressadores estão distribuídos na matriz do dressador. Empregam-se

diamantes com granulometria máxima equivalente à espessura do disco dressador, com distribuição aleatória, ou diamantes aciculares, com seções transversais de 0,5 x 0,5 a 1,0 x 1,0 mm<sup>2</sup>. Estes últimos são dispostos de forma radial no dressador, levando-se em consideração a direção de maior dureza do diamante, ou seja, a direção  $[1\ 0\ 0]$ .

Os dressadores acionados tipo copo são empregados no dressamento de rebolos cilíndricos retos [01]. A sua principal aplicação ocorre no dressamento de rebolos vitrificados de CBN para a retificação interna.

### 2.3.7. Variáveis de processo no dressamento

Devido à possibilidade de controle da relação de velocidades no dressamento –  $q_d$  – dada pela razão entre a velocidade do disco ou rolo dressador –  $v_{rd}$  – e a velocidade do rebolo no dressamento –  $v_{sd}$  – mostrada na Equação 2.7 – é possível a obtenção da estrutura desejada no dressamento de rebolos vitrificados.

$$q_d = \frac{v_{rd}}{v_{sd}} \quad 2.7$$

Estas variáveis podem ser visualizadas na Figura 2.18, na qual os termos  $v_{fra}$  e  $v_{far}$  são as velocidades de avanço radial a axial no dressamento, respectivamente [01]. Com o controle da relação de velocidades, obtém-se a agressividade desejada no rebolo. A agressividade é verificada pela avaliação da qualidade da primeira peça retificada após o dressamento, medindo-se a rugosidade inicial –  $R_{ts0}$ . A  $R_{ts0}$  é correlacionada também às forças e ao desgaste do rebolo –  $\Delta r_{swr}$  [02].

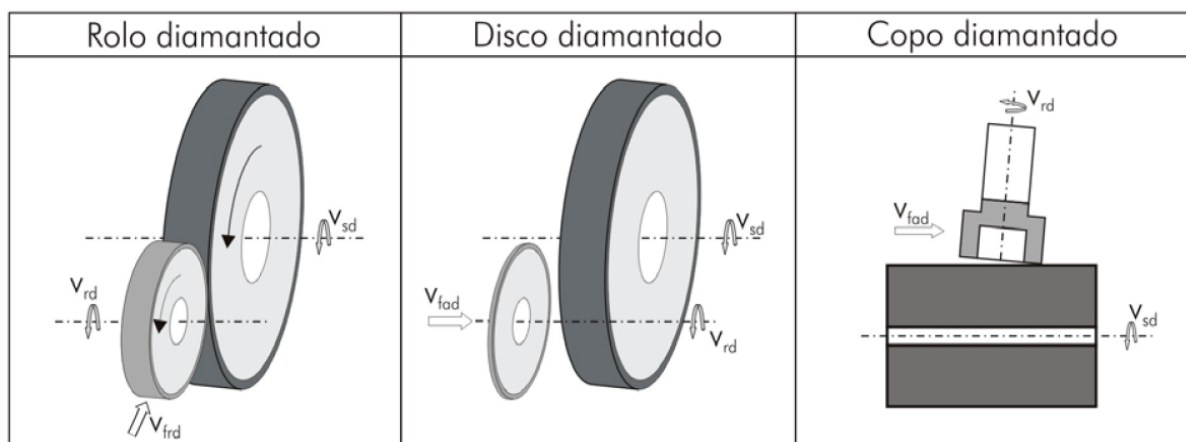


Figura 2.18 – Ferramentas de dressamento acionadas [01].

A Figura 2.19 mostra a variação da rugosidade inicial ( $R_{st0}$ ) no dressamento concordante e discordante, variando-se a velocidade periférica do rolo dressador. Para a relação de velocidades  $q_d = 1$ , o rolo dressador apresenta a mesma velocidade periférica que o rebolo.

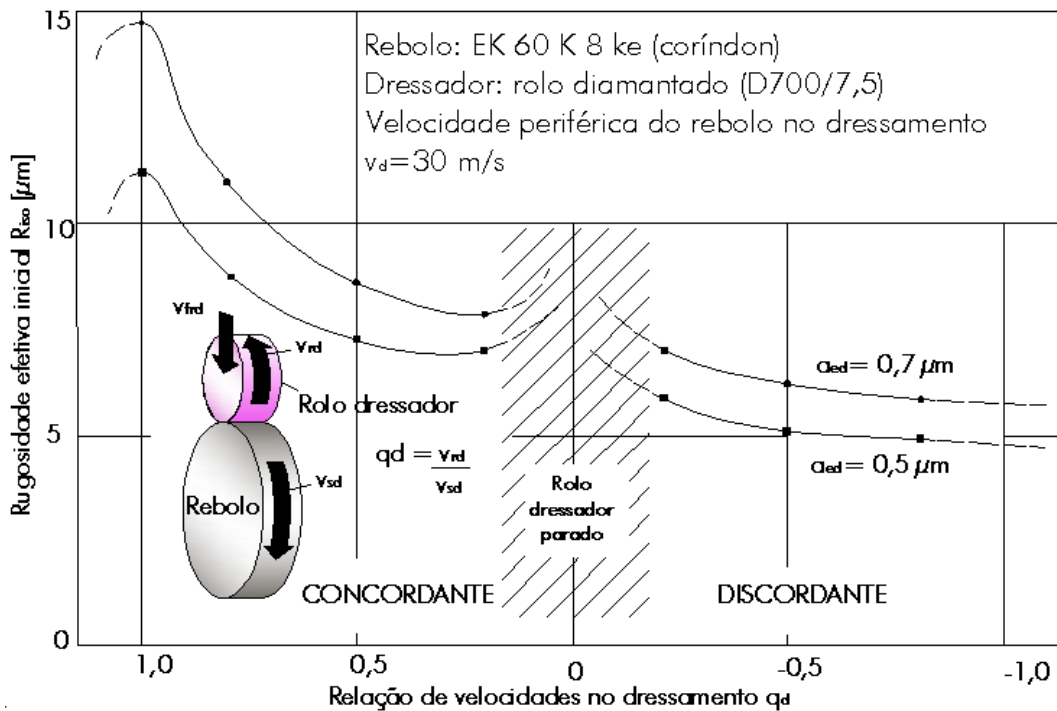


Figura 2.19 – Variação da rugosidade inicial como função da relação de velocidades nos dressamentos concordante e discordante [16]

Os diamantes maiores do rolo dressador penetram na superfície do rebolo, marcando este com endentamentos e reduzindo o número de gumes ativos do rebolo. Esta situação particular é denominada “*crusheamento*” e apresenta a pior rugosidade nas componentes retificadas. Tanto para relações de velocidade maiores do que 1 quanto para menores do que 1 a rugosidade das peças retificadas diminui, pois diminui a penetração de cada gume do rolo dressador sobre o rebolo e aumenta o comprimento da trajetória de ação dos gumes do rolo dressador. Diminuindo a relação de velocidades de 1 para 0, inicialmente a rugosidade da peça diminui, pois se verifica um contínuo aumento do comprimento de contato entre cada gume do rolo dressador sobre o rebolo.

Quando a relação se aproxima a zero, o rolo dressador passa a completar menos de uma volta para o dressamento de toda a circunferência do rebolo, diminuindo o número de gumes ativos que efetuam o dressamento. Para a relação de velocidades  $q_d = 0$ , apenas os gumes de uma linha evolvente do rolo dressador efetua o dressamento,

levando a um aumento da rugosidade da peça. Como nesta região de relações de velocidade não se obtém repetitividade de resultados, ela não é recomendável. Para relações de dressamento decrescentes –  $q_d < 0$  – a rugosidade da peça aumenta pelo contínuo aumento do número de gumes que efetuam o dressamento.

O processo de perfilamento é principalmente caracterizado pelo grau de recobrimento,  $U_d$ , pela relação de velocidades,  $q_d$ , e pela profundidade de penetração,  $a_{ed}$  [01, 07][07]. Estes parâmetros influenciam a topografia do rebolo, que é caracterizada pela rugosidade efetiva,  $R_{ts}$ . A rugosidade efetiva é medida num corpo de prova retificado com uma relação de rotações entre peça e rebolo de 1 para 3, de modo que a topografia do rebolo se reproduz 3 vezes na superfície da peça.

O grau de recobrimento é determinado pelo quociente entre a largura efetiva da ferramenta de perfilar,  $b_d$ , e o avanço axial,  $f_d$ , conforme a Equação 2.8. O emprego de um grau de recobrimento com valor inferior a 1 não leva à remoção completa da camada periférica do rebolo. Valores próximos a 1 resultam em uma maior agressividade do rebolo – maiores valores de rugosidade efetiva  $R_{ts}$  –, e valores maiores proporcionam uma topografia menos agressiva, com maior quantidade de gumes na periferia, proporcionando um melhor acabamento da superfície retificada [01][01, 07].

$$U_d = \frac{b_d}{f_d} \quad 2.8$$

Segundo Oliveira *apud* Bertalan [02], em perfilamentos com baixos valores de velocidade axial  $v_{fad}$  e pequena profundidade de penetração  $a_{ed}$ , partículas muito pequenas são removidas, causando a criação de planos no topo dos grãos e tornando-os pouco agressivos. Valores altos de velocidade axial  $v_{fad}$  e profundidade de penetração  $a_{ed}$  maiores proporcionam um perfil bastante agressivo no rebolo. Apesar de o aumento da agressividade representar um aumento da capacidade de remoção de material, isto resulta também em valores da rugosidade maiores na peça e maior taxa de desgaste do rebolo.

## 2.4. Retificadoras

As retificadoras são máquinas-ferramentas empregadas em operações de acabamento de superfícies técnicas, operações de corte e operações de afiação. Elas podem ser empregadas em regime de desbaste ou de acabamento de superfícies planas,

cilíndricas e cônicas, interna ou externamente [11][11, 13]. A geração significativa de calor – item 2.1.4 – torna a estabilização térmica um requisito de fundamental importância para a obtenção de bons resultados em termos precisão geométrica e de qualidade de superfície [30][30, 31].

Em máquinas retificadoras de alta precisão pode-se obter erros de dimensão inferiores a  $1\text{ }\mu\text{m}$ . A Figura 2.20 mostra a evolução da precisão geométrica obtível pelos processos de usinagem ao longo das duas últimas décadas do século XX –, Taniguchi *apud* Porto [32].

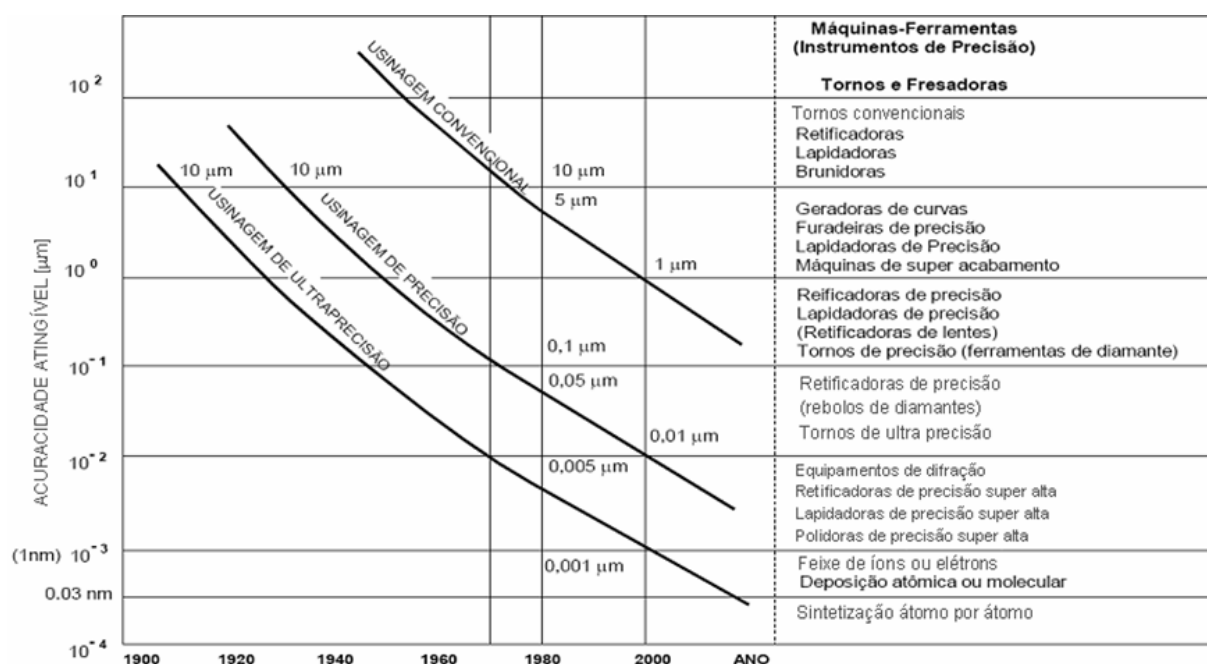


Figura 2.20 – Evolução da precisão na usinagem no século XX [33].

#### 2.4.1. Componentes de uma retificadora

O projeto de máquinas-ferramentas consiste basicamente na integração de subsistemas que podem ser adquiridos de diferentes fornecedores, não sendo necessário o domínio de todos os processos produtivos necessários à obtenção de uma máquina-ferramenta [34].

Da estrutura à eletrônica de controle, todos os elementos constituintes de uma máquina-ferramenta podem ser encomendados a terceiros ou encontrados comercialmente [35][35, 36, 37].

### ***Estrutura de uma retificadora***

É sobre a estrutura ou base de uma máquina-ferramenta que serão montados todos os seus demais elementos constituintes [12]. Os elementos complementares põem ser guias, acionamentos, sistemas de medição e controle, dispositivos de segurança, sistemas hidráulicos ou pneumáticos, fiações, tubulações, sistemas de coleta e remoção de cavacos e fluidos, etc.

O projeto da estrutura de uma retificadora deve atender os seguintes requisitos [36[36, 37, 38, 39]:

- Rigidez;
- Estabilidade térmica;
- Estabilidade química;
- Favorecimento do acesso aos componentes internos.

### ***Sistemas de fixação da peça em retificadoras***

O sistema de fixação da peça em uma retificadora universal deve garantir exatidão de posicionamento e possibilitar o reposicionamento da peça na máquina. Além disto, o sistema porta-peça de uma retificadora deve proporcionar facilidade na troca da peça de trabalho e ser de fácil acesso e operação.

Em se tratando de sistemas nos quais as peças sofram alguma movimentação, os erros característicos de tais deslocamentos devem ser menores do que aqueles a serem considerados como máximos admissíveis para o processo de usinagem [13[13, 15].

Em retificadoras planas, a mesa sobre a qual é fixada a peça apresenta movimentação linear. A fixação da peça é magnética. A profundidade de corte é ajustada pela altura relativa entre rebolo e peça [01[01, 13, 15]].

Este sistema de fixação de peças traz como desvantagem o fato de só poder trabalhar com peças ferro-magnéticas. Outras opções são a fixação por congelamento – diodo Peltier – e a fixação a vácuo.

Em retificadoras cilíndricas, o sistema de fixação da peça na máquina pode ser o “entre pontas”. Nesta configuração, a peça é levada a girar com o auxílio de um arrastador, no cabeçote. Na Figura 2.21 são mostrados os eixos de orientação do carro porta-rebolo. A peça é montada entre-pontas na direção Z. Tanto a parte do cabeçote

quanto a contra-ponta são fixos, com o objetivo de reduzir o batimento da peça. A distância entre pontas é ajustada de acordo como tamanho da peça.

Outras formas de fixação de peças em retificadoras universais fazem uso de placas de precisão e sistemas de pinças. Na fabricação seriada é comum o uso de dispositivos especiais.

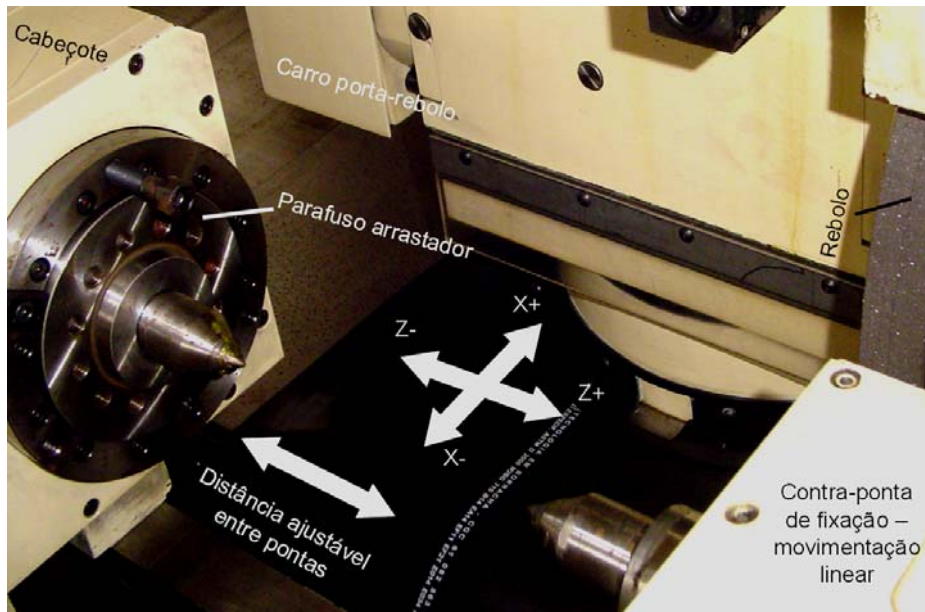


Figura 2.21 – Sistema de montagem da peça em retificadora cilíndrica.

Dependendo do nível de qualidade esperada de trabalho, deve ser dada atenção ao funcionamento do sistema de fixação para que o mesmo não deforme a peça de trabalho além de um nível aceitável.

### ***Sistemas de fixação da ferramenta em retificadoras***

A montagem de um rebolo em uma retificadora é feita com o emprego de um dispositivo composto por dois flanges específicos para a retificadora em questão. Os flanges, além de servirem de interface para a retificadora, ainda apresentam ranhuras circunferenciais nas quais são dispostas castanhas que servem para a colocação de massas para a correção de desbalanceamento, conforme mostra a Figura 2.22.

O rebolo é montado entre dois flanges havendo uma cartolina entre cada flange e o rebolo. A função das cartolinas é distribuir a força de montagem decorrente do aperto dos parafusos, sobre uma superfície maior do rebolo. O aperto das flanges contra o rebolo é distribuído sobre uma superfície de aperto na borda externa das flanges. As superfícies de aperto das duas flanges devem obrigatoriamente ter o mesmo diâmetro.



Rebolos com corpo de aço são montados diretamente contra o flange de interface do rebolo.

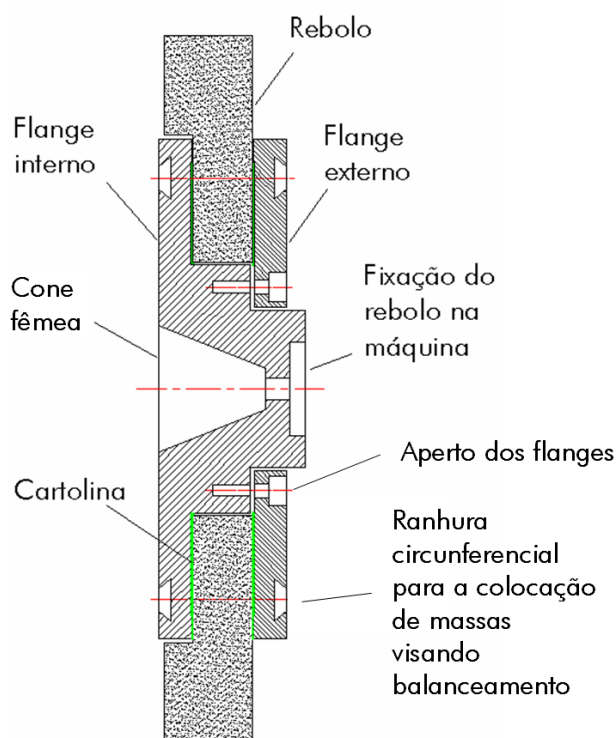


Figura 2.22 – Rebolo montado num flange.

A montagem correta do rebolo no eixo porta rebolo é muito importante. Uma montagem inadequada torna-se potencialmente perigosa [40], pois o rebolo, em funcionamento, pode atingir altas rotações e nestas circunstâncias, massas desbalanceadas causam esforços de fadiga no fuso, o que pode acarretar na quebra do mesmo. Nesta situação, não raro, a pedra do rebolo quebra e os pedaços quebrados saem pela tangente. Cada pedaço se torna um projétil com inércia suficiente para causar ferimentos graves.

Vale ainda dizer que o tamanho do rebolo especificado para uma retificadora não deve ser excedido em diâmetro ou largura, caso contrário, não estarão garantidas as boas condições de funcionamento da retificadora.

Os seguintes itens fazem parte dos métodos e procedimentos a serem adotados na montagem de rebolos em flanges [12]:

- O diâmetro do flange deve ser no mínimo igual a um terço do diâmetro do rebolo.

- A diferença entre os diâmetros do furo do rebolo e do diâmetro de montagem não deve superar os 0,05 mm. Uma diferença maior resultará numa maior dificuldade na centragem do rebolo. Em alguns casos, pode ser necessário o emprego de buchas para adaptação dos diâmetro.

O fuso da retificadora apresenta um cone macho, na extremidade do fuso de montagem do rebolo. O flange no qual é montado o rebolo apresenta um cone fêmea, o qual deve ser encaixado no cone macho da máquina-ferramenta para garantir a centragem entre as citadas partes.

### *Sistema de guias*

O sistema de guias hidrostáticas de uma máquina-ferramenta é formado por elementos que tornam possível um movimento relativo entre componentes, sob um determinado padrão de movimento. No caso de guias lineares, este padrão é retilíneo e, de modo geral, restrito a um único grau de liberdade [11[11, 39].

O sistema de guias é dividido em três regiões, como mostra a Figura 2.23: o estator, a interface e a sapata móvel.

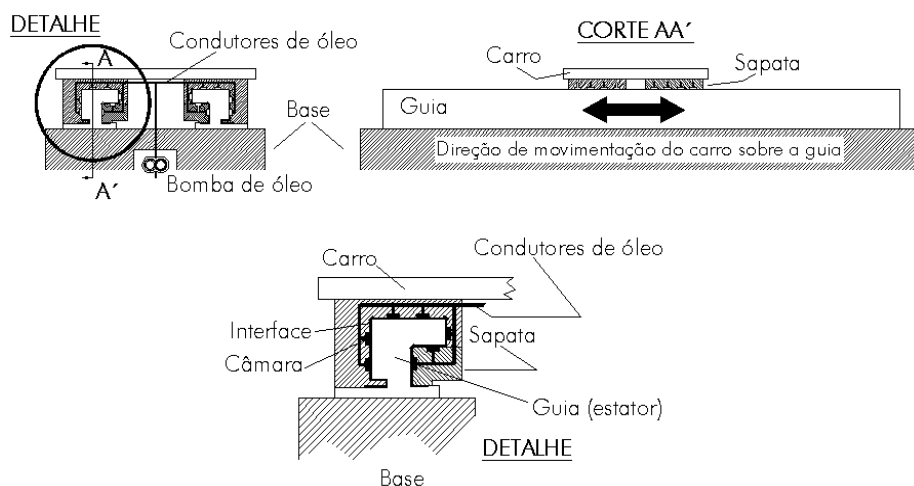


Figura 2.23 – Regiões de uma guia hidrostática linear.

O estator é a parte fixa na estrutura da máquina. A interface é o meio entre o estator e a sapata que, por sua vez, é o componente que realiza a movimentação relativa. A interface é responsável por fornecer o princípio de sustentação da guia e pode ser composta por elementos rolantes, por um meio gasoso ou por um líquido [39[39, 41]. As guias lineares da retificadora Flexa 600 empregada neste trabalho são hidrostáticas – meio líquido –, desenvolvidas pelo próprio fabricante.

A guia hidrostática faz uso de óleo pressurizado como elemento de separação entre as partes que se movimentam, geando o seu princípio de sustentação, o que possibilita:

- Tornar desprezível o desgaste das guias,
- A eliminação de *stick slip*,
- Movimento suave,
- Eliminação de folgas, e
- Rigidez elevada.

### **Sistema de avanço**

Os sistemas de avanço de máquinas CNC são compostos por um acionamento elétrico, um conversor de movimento e um sistema de medição.

O sistema de medição pode ser linear e ser montado paralelo à direção do movimento a ser medido ou ser acoplado ao servo-motor. Um fuso de esferas recirculantes – Figura 2.24 – transforma o movimento rotativo do servo motor em um movimento linear.



Figura 2.24 – Fuso de esferas recirculantes [42]

### **Sensores de posição**

Existem diversos tipos de sensores de posição disponíveis no mercado. Eles podem ser classificados conforme mostrado na Tabela 2.2] Neste trabalho de pesquisa, a máquina empregada na realização dos ensaios faz uso dos sensores de posição rotativos ópticos, também denominados encoders.

Tabela 2.2 – Classificação dos sensores de posição.

Lineares	Rotativos	Sensores de proximidade
Resistivos Indutivos Ópticos	Resistivos Indutivos Ópticos Magnéticos de efeito hall Tipo revolver	Capacitivos Indutivos

*Encoders* – do Inglês, codificador – são sensores que atuam por transmissão de luz. Eles determinam a posição através de um disco ou trilho marcado – Figura 2.25. Em processos de retificação são muito utilizados para medir a velocidade do rebolo.

Estes dispositivos dividem-se em: relativos, nos quais a posição é demarcada por contagem de pulsos transmitidos, acumulados ao longo do tempo; e absolutos, onde há um código digital gravado no disco ou trilho, lido por um conjunto de sensores ópticos – fonte de luz e sensor.

A demarcação do disco ou trilho é feita através de furo ou ranhuras, ou por pintura num disco plástico transparente, o que pode ser feito por técnicas fotolitográficas, permitindo precisão micrométrica. A maioria dos *encoders* angulares é composta por um disco código de plástico ou vidro, sobre o qual é fotolitogravado um padrão radial organizado em trilhas. Quando as linhas radiais em cada trilha interrompem o feixe de luz num par foto emissor-receptor, são produzidos pulsos digitais.

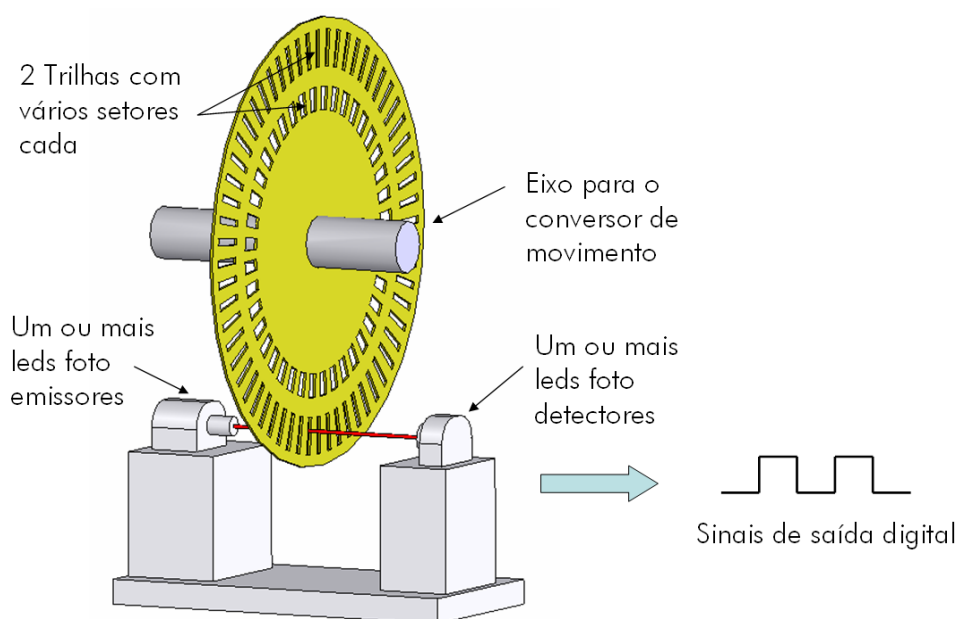


Figura 2.25 - Encoder angular óptico.

A fonte de luz é geralmente um LED – *Light Emissor Diode* –, e o sensor, um fotodiodo ou foto-transistor. Estes sensores são muito precisos e práticos em sistemas digitais.

Existem *encoders* angulares e lineares. O tipo mais usado é o angular, sendo o mesmo fabricado em duas formas básicas: o absoluto e o incremental. A posição do *encoder* incremental é dada por pulsos a partir do pulso zero, enquanto a posição do *encoder* absoluto é determinada pela leitura de um código e este é único para cada posição do seu curso [11[11, 41].

Se um *encoder* é acoplado à ponta de um fuso de esferas recirculantes, conforme mostrado no esquema da Figura 2.26, pode-se fazer a associação entre o movimento angular medido no *encoder* e o linear do carro do fuso.

O erro médio obtenível com este tipo de componente, quando utilizado com uma máquina com sistema de posicionamento com malha fechada é inferior a 1  $\mu\text{m}$ .

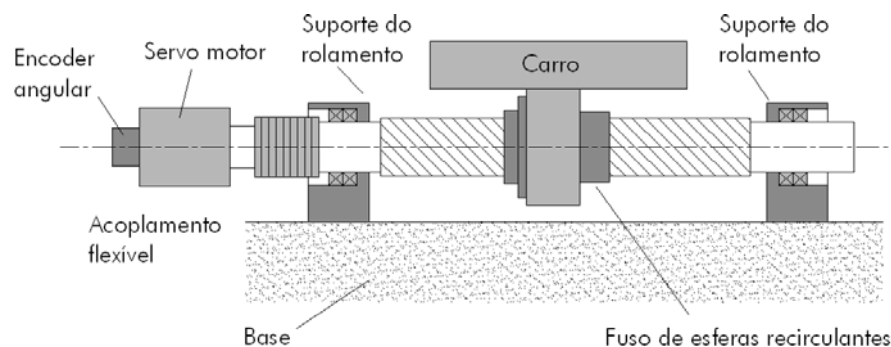


Figura 2.26 – Sistema controlado de movimentação linear [38].

### ***Trocadores de calor***

Trocadores de calor são dispositivos empregados para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos a diferentes temperaturas. Esta troca é por vezes necessária às máquinas-ferramentas empregadas na área da fabricação. Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com disposição das correntes dos fluidos e de acordo com o tipo de sua construção [43]. Com relação à disposição das correntes, dividem-se em:

- Correntes paralelas,
- Contracorrente,
- Correntes cruzadas e
- Multipasse.

Segundo a construção os trocadores podem ser:

- De tubos coaxiais,
- Casco e tubos, e
- Compactos.

A máquina retificadora utilizada nesta pesquisa faz uso de um trocador de calor de casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos, e que opera em contracorrente – Figura 2.27 [43].

No trocador mostrado na Figura 2.27, os fluidos envolvidos passam uma vez no casco e uma vez nos tubos. As chicanas são instaladas com o objetivo de aumentar o coeficiente de convecção do fluido que circula do lado do casco. Elas provocam turbulência e uma componente transversal de velocidade [43].

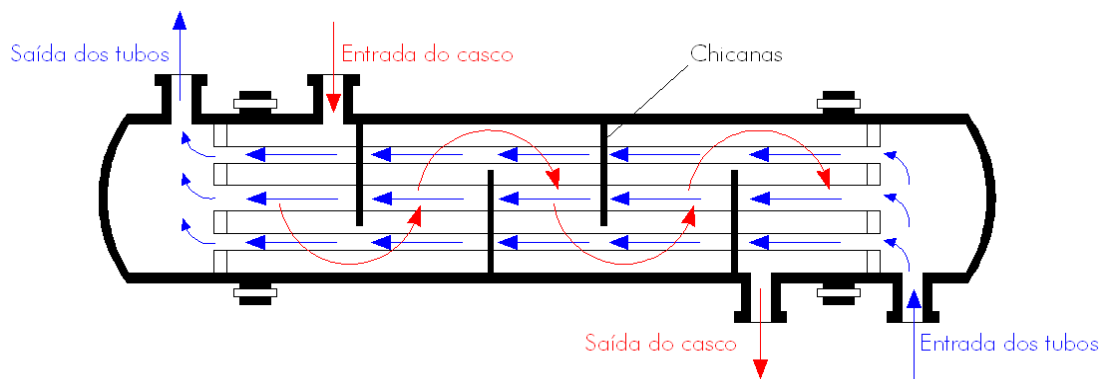


Figura 2.27 – Trocador de calor de casco e tubos [43].

#### 2.4.2. Sistemas de detecção de toque ferramenta /peça

A detecção do toque entre ferramenta e peça é um dos problemas notáveis no estudo do processo de retificação [01, 08, 17]. Dentre os dispositivos desenvolvidos para este fim, os sensores de emissão acústica destacam-se devido à possibilidade que oferecem de detecção do toque com uma interferência entre partes inferior a  $0,5\ \mu\text{m}$  [17, 18].

Na

Figura 2.28 são mostrados esquemas dos principais tipos de sensores de emissão acústica disponíveis no mercado e um resumo das principais características implícitas aos mesmos.

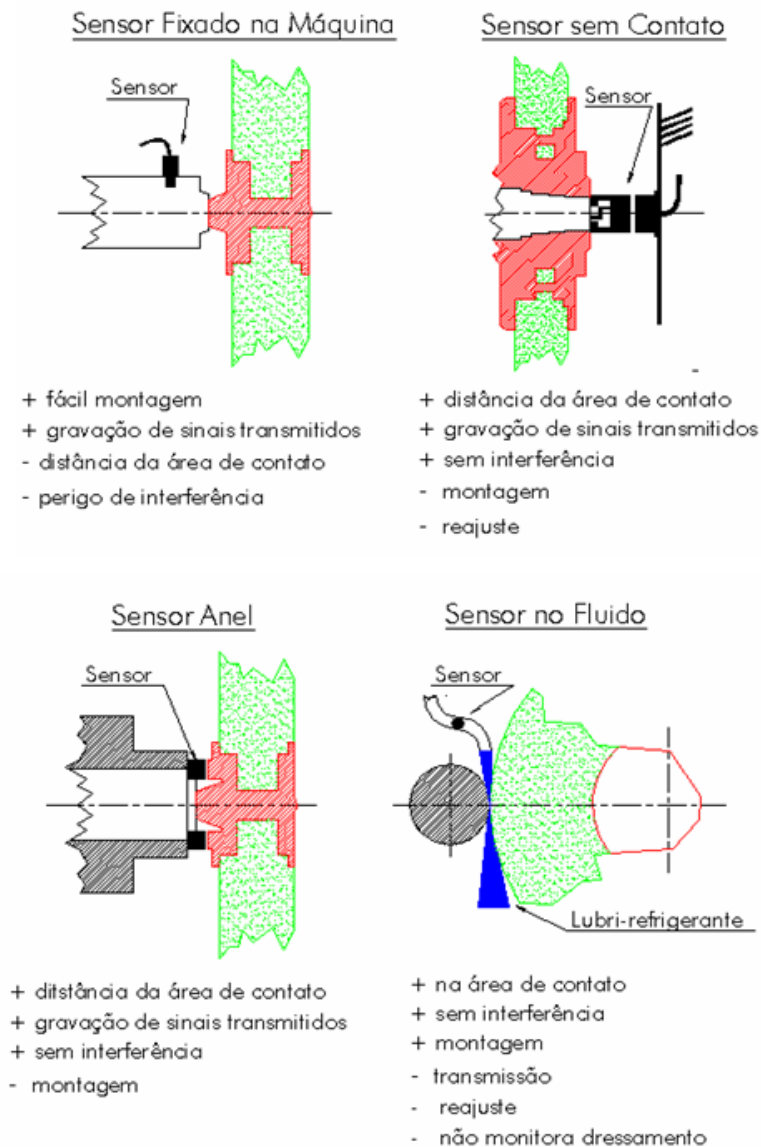


Figura 2.28 – Tipos de sensores de emissão acústica.

Os  $0,5 \mu\text{m}$  de interferência para a detecção do toque tornam os sensores de EA especialmente interessantes para o estudo do processo de retificação, pois nestas condições pode-se garantir o toque puro, ou seja, o não arrancamento de material na forma de cavaco [29, 44].

O monitoramento de processos de usinagem utilizando emissão acústica apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos, dentre elas [45]:

- O sensor é simples, barato e pequeno (pouco intrusivo);
- As fontes de emissão acústica estão diretamente relacionadas com o processo de corte;

- Não sofre influência de ruídos e vibrações mecânicas por captar um sinal em alta frequência – 50 kHz a 1 MHz.

## 2.5. O desempenho geométrico

O desempenho funcional de um produto sofre influências de problemas de projeto, de fabricação ou do próprio processo desempenhado pelo equipamento concebido. A ocorrência de problemas de fabricação está muitas vezes associada à não observância das especificações de projeto referentes aos materiais a serem adotados e/ou às tolerâncias indicadas [36, 37, 38, 39].

O crescente desenvolvimento tecnológico resulta numa demanda cada vez maior por segurança e rendimento dos sistemas mecânicos. Para a satisfação de tais exigências faz-se necessária especial atenção à qualificação das máquinas e equipamentos [30].

Para estarem em conformidade com as tendências expostas, as máquinas-ferramentas empregadas em processos de usinagem devem proporcionar a associação da alta produtividade com a qualidade de fabricação. A verificação do comportamento geométrico destas máquinas é importante para a qualificação do seu desempenho e deve ser realizada periodicamente [12, 35, 39].

Um corpo livre pode apresentar seis graus de liberdade de movimentação: translações nas direções coordenadas X, Y, Z e as respectivas rotações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  sobre as citadas direções. Uma máquina-ferramenta para a usinagem pode ser classificada segundo o “número de graus de liberdade”, isto é, o número de possíveis direções de corte a serem realizados numa peça de trabalho, quando presa à máquina-ferramenta [36].

Uma parte da ferramenta ou da peça, que pode ser um ponto, um gume ou uma superfície, descreve uma trajetória dentro do campo de trabalho da máquina. A existência de uma diferença entre a trajetória real e a ideal implica na ocorrência de um erro geométrico sobre o resultado do trabalho [30]. O erro de trajetória em um ponto escolhido aleatoriamente é caracterizado por parcelas de erros lineares –  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  – e angulares –  $d\alpha$ ,  $d\beta$  e  $d\gamma$ .

A Figura 2.29 mostra os seis possíveis erros para o deslocamento de um carro sobre uma guia no eixo z, erros estes, listados a seguir:

- $dx$  – Erro de deslocamento em x;



- $dy$  – Erro de deslocamento em  $y$ ;
- $dz$  – Erro de deslocamento em  $z$ ;
- $d\alpha$  – Arfagem ou erro de deslocamento angular em torno do eixo  $x$ ;
- $d\beta$  – Guinada ou erro de deslocamento angular em torno do eixo  $y$ ; e
- $d\gamma$  – Rolamento ou erro de deslocamento angular em torno do eixo  $z$ .

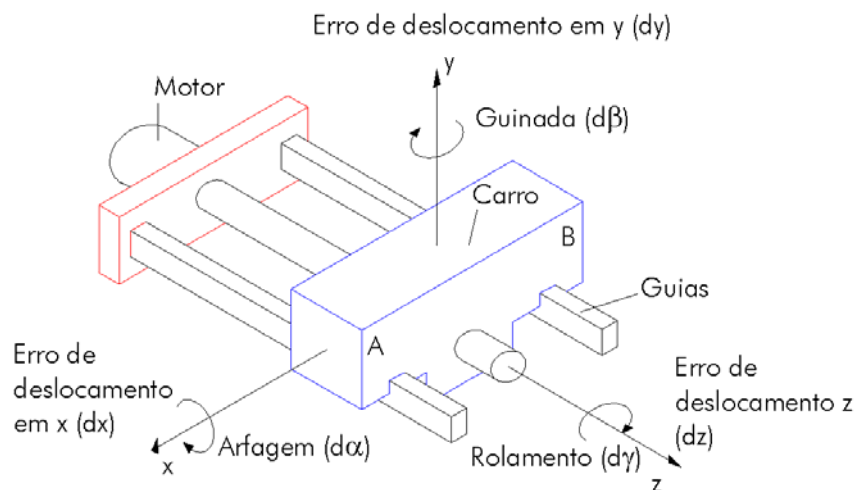


Figura 2.29 - Erros para deslocamento numa máquina-ferramenta [30].

Os erros Arfagem, Guinada e Rolamento não estão relacionados aos eixos  $x$ ,  $y$  ou  $z$ , sendo função apenas do sentido de movimentação. Os motivos para a ocorrência de qualquer dos erros podem ser [30, 31]:

- Dilatações térmicas;
- Deformações mecânicas causadas por forças atuantes (cortes, peso próprio, peso das peças); e
- Folgas entre componentes do mecanismo de acionamento.

Um caso de particular interesse para este trabalho é o da verificação da precisão de posicionamento de um carro porta rebolo de uma retificadora comandada numericamente. Tal verificação pode ser feita com o auxílio da norma ISO 230-2, a qual norteia este tipo de procedimento.

Segundo alguns autores, a “arfagem” recebe a denominação de “rolamento”, a “guinada”, “guinamento” e o “rolamento”, “tombamento” [30, 37]. No entanto, neste trabalho são adotados os termos de identificação dos erros indicados seguindo orientações da adotadas em aeronáutica. Como não existe um consenso entre os autores nesta área, fica a critério do leitor qual conceito adotar.

### 2.5.1. Verificação de máquinas-ferramentas

O comportamento geométrico de uma máquina-ferramenta deve ser verificado para a confirmação de sua qualidade. Tal verificação pode se dar [12]:

- Pelo método da peça padrão;
- Por ensaios geométricos; e
- Pela análise da capacidade.

#### *Método de verificação por peça padrão*

O método de verificação por peça padrão baseia-se no controle geométrico de uma ou de várias peças produzidas pela máquina sob verificação. Em caso de máquinas dedicadas, pode-se fazer uso da geometria da própria peça a ser executada na máquina ou, em se tratando de máquinas universais, pode-se adotar uma peça de geometria padronizada, a qual permita identificar diversos parâmetros [30].

Este método verifica a máquina em condições efetivas de trabalho e a medição pode, não raro, ser realizada com instrumentos convencionais. Os erros identificados por este procedimento são função do material da peça, da geometria da ferramenta, das condições de corte, dos dispositivos de fixação e das técnicas de medição [30].

Este método pode apresentar dificuldades em correlacionar os erros da peça com os erros da máquina e por razões econômicas, para que se possa avaliar, a verificação é restrita a uma parte do campo de trabalho da máquina [30].

#### *Método de verificação por ensaios geométricos*

O método de verificação por ensaios geométricos consiste na análise do desempenho através da medição da forma e da dimensão de seus componentes, assim como da mensuração dos movimentos da ferramenta em relação à peça dentro do campo de trabalho de máquina [30]

Os ensaios geométricos apresentam a grande vantagem de possibilitar a medição em todo o campo de trabalho e permitir uma identificação das fontes de erros geométricos da máquina-ferramenta. Por outro lado, apresentam a desvantagem da morosidade nas diversas etapas:

- Na preparação, em função da montagem dos instrumentos de medição;
- Na execução do ensaio, em função do grande número de informações a registrar; e

- Na documentação, em função da complexidade do processamento e da elaboração de gráficos adequados a análise dos resultados.

Através da automatização do procedimento de ensaio e do uso de sistemas computacionais e periféricos para o processamento dos dados de medição e documentação, são reduzidos os fatores responsáveis pela morosidade. Isto torna os ensaios geométricos uma ferramenta mais atrativa na verificação de máquinas-ferramentas [30]. A ISO 230-2 regulamenta este tipo de verificação e serve, neste trabalho, como base dos procedimentos adotados [47].

A qualidade do sistema de posicionamento do carro porta rebolo de uma retificadora Flexa 600-L é influenciada pelo comportamento da máquina, devido às dilatações térmicas que sofre, oriundas do aquecimento do óleo do sistema hidráulico ou decorrentes da energia liberada pelo processo de retificação.

Para que a medição da qualidade geométrica seja confiável, a máquina-ferramenta deve estar termicamente estabilizada, quer por um sistema adequado, quer por um sistema auxiliar de estabilização de temperatura.

Para que se possa avaliar a influência da estabilização da temperatura da máquina-ferramenta são efetuadas verificações geométricas com a máquina fria e em regime de trabalho estabilizado.

A verificação da qualidade geométrica do sistema de posicionamento da máquina-ferramenta é efetuada com o auxílio de um sistema de medição complementar externo. Os sistemas que mais se prestam para esta avaliação são os sistemas de interferometria com luz LASER – uma fonte de luz polarizada e coerente. Estes sistemas não requerem modificações na máquina-ferramenta para a sua instalação e oferecem resultados de medição com uma resolução submicrométrica, suficiente para o ensaio geométrico de máquinas-ferramentas convencionais.

## **2.6. Interferometria**

Há uma constante melhoria nos processos de fabricação. Isto exige o desenvolvimento de sistemas de medição cada vez mais precisos. Os sistemas ópticos possibilitam a melhor qualidade de medição de deslocamentos, por apresentarem um dos padrões de referência mais estáveis: o comprimento de onda de luz. O princípio de medição de deslocamentos por interferometria se baseia na contagem de franjas de

interferência que se formam entre a luz incidente e a luz refletida por um espelho. Num deslocamento de meio comprimento de onda do espelho refletor –  $\frac{1}{2}\lambda$  – a interferência entre o feixe incidente e o feixe refletido passa por um ciclo inteiro de interferência, o qual é detectado por um sensor montado sobre o eixo óptico [48].

O interferômetro mais comum na interferometria óptica é o de Michelson. O funcionamento do equipamento, mostrado na Figura 2.30, baseia-se na emissão de um feixe de luz monocromático – 1 – até um espelho semi-transparente – 2. Este espelho possui um revestimento de prata com espessura suficiente para transmitir metade da luz incidente e refletir a outra metade. Assim, a luz é dividida em dois feixes: um deles é chamado de onda do objeto – 3 –, o qual prossegue até o espelho lateral – 4. O outro feixe é chamado de onda de referência – 5 – o qual é refletido e enviado ao espelho superior – 6. Cada um dos espelhos reflete os feixes ao longo das suas direções de incidência até se encontrarem no espelho divisor – 2 –, no qual ocorre a interferência – 7. forma-se, então, um mapa de franjas. Neste mapa, a interferência é representada por franjas claras – interferência construtiva – e escuras – interferência destrutiva [48].

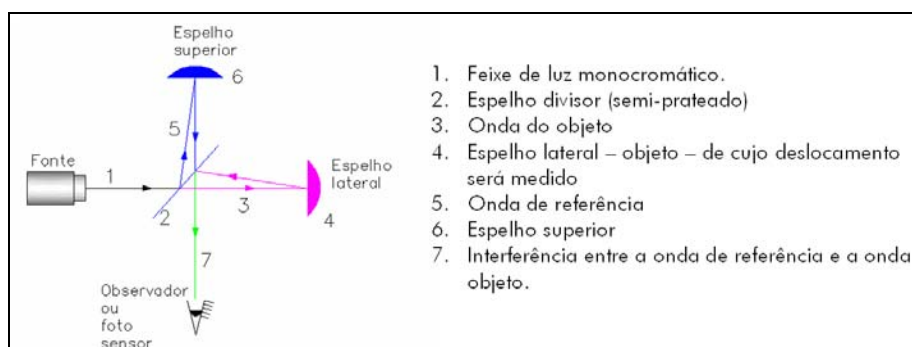


Figura 2.30 – Representação esquemática do interferômetro de Michelson.

Um deslocamento do espelho lateral sobre o eixo óptico altera a fase em que as ondas se encontram e, conseqüentemente, o mapa padrão inicialmente formado em 7. Entre dois picos consecutivos de interferência verifica-se um deslocamento de meio comprimento de onda [32, 49]. Assim, fica clara a detecção de deslocamentos na ordem de grandeza do comprimento de onda do laser e até subdivisões deste.

## 2.7. Monitoramento do processo de retificação

O crescente aumento dos custos de produção faz da automação da manufatura um importante objetivo a ser atingido. Com a competição mundial e as tendências da

indústria atual focalizadas na automação e integração da manufatura, pesquisas estão sendo direcionadas ao desenvolvimento de metodologias avançadas para controle e monitoramento em processos de manufatura. Além disso, projetos avançados de sensores aliados à tecnologia de processamento de sinais permitem melhor informação sobre as condições do processo, o que possibilita sua otimização e controle. Esta otimização pode ocorrer até em tempo real, no momento da execução do processo.

O monitoramento dos sistemas de usinagem é necessário para assegurar bom desempenho dos processos e máquinas – [52]. O foco do monitoramento pode estar na máquina – monitoramento do desempenho e diagnósticos –, na ferramenta – desgaste, alinhamento e lubrificação –, na peça – dimensões, geometria, rugosidade e tolerâncias – ou no próprio processo – formação de cavaco, temperatura e energia consumida.

Além disto, o monitoramento também é relevante nos quesitos segurança, prevenção de defeitos na máquina, prevenção de rejeição de peças, prevenção de tempo inativo na máquina e otimização dos recursos disponíveis da máquina e do material [37, 53].

Os sensores para monitoramento devem reunir os seguintes requisitos [54]:

- Sua medição deve ocorrer o mais próximo possível do ponto de usinagem.
- Não deve haver redução da rigidez dinâmica e estática da máquina-ferramenta.
- Não deve haver restrição de espaço útil de usinagem e dos parâmetros de corte.
- Devem ser livres de desgaste e manutenção, ter troca fácil, se necessário, e baixo custo.
- Devem ser resistentes à sujeira, cavacos e interferências mecânicas, eletromagnéticas e térmicas.
- Devem ter funcionamento independente da ferramenta e da peça.
- Devem permitir transmissão de sinal confiável, por exemplo, de componentes de máquinas fixos para rotativos.

Os sensores mais utilizados em processos de usinagem são os de: emissão acústica, força, potência, aceleração/vibração, deslocamento e temperatura. Dentre os vários tipos de sensores para monitoramento de processos de torneamento, a EA tem

posição de destaque. A Figura 2.31 ilustra esquematicamente diferentes tipos de sensores para parâmetros de controle distintos.

O monitoramento do processo de retificação visa reconhecer o estado atual do processo com o intuito de interferir sobre o mesmo, sempre que certos limites estabelecidos sejam ultrapassados ou quando uma combinação de características apresenta uma determinada forma. O monitoramento da retificação é frequentemente feito pela observação da emissão acústica. As ondas elásticas se propagam pelo interior do sólido e podem ser detectadas por transdutores acoplados diretamente nos sólidos ou por sensores externos. A frequência de interesse para acompanhamento do processo de retificação normalmente se situa acima da frequência audível.

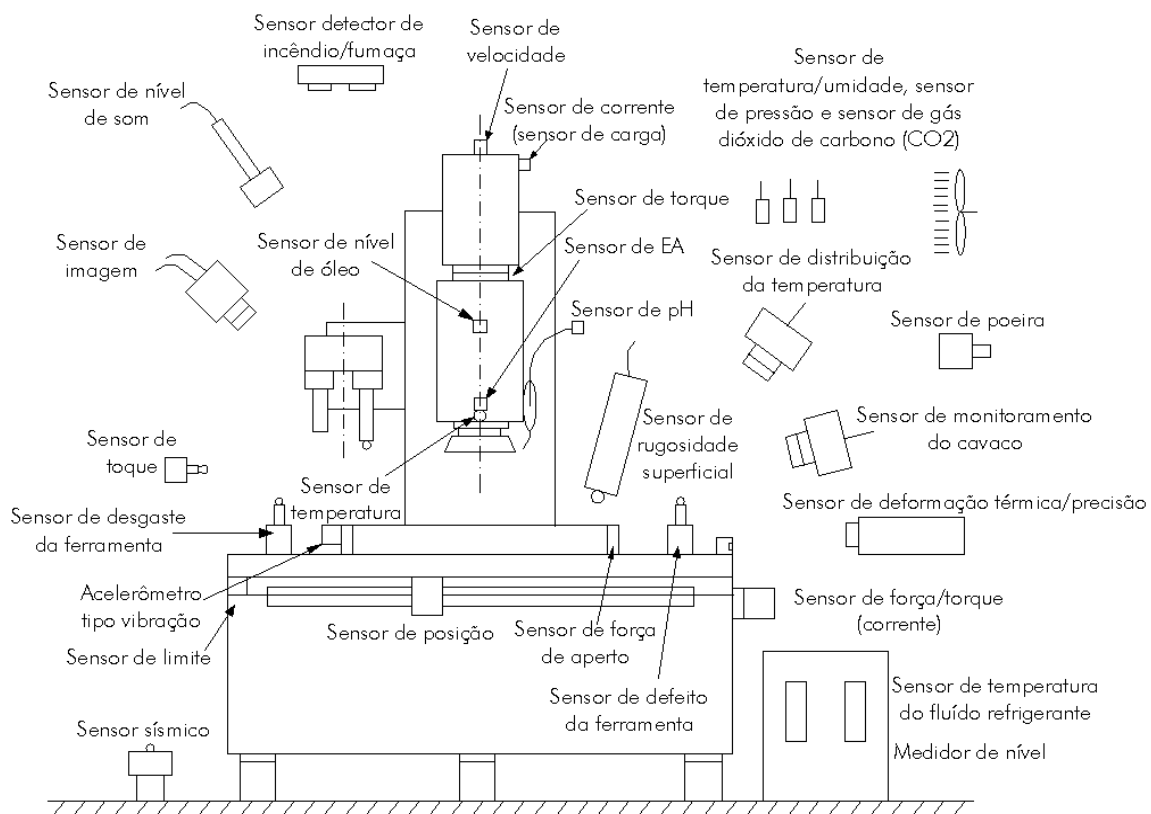


Figura 2.31 – Tipos de sensores existentes em ambiente de manufatura [55].

Os sensores de EA apresentam melhores respostas nas faixas de altas frequências, não sendo influenciados pelos ruídos de baixa frequência [52, 54]. A sensibilidade do sinal de EA aos diversos modos de remoção e a técnicas mais apuradas, como endentação e riscamento, levaram à aplicação em processos como retificação e torneamento Figura 2.32.

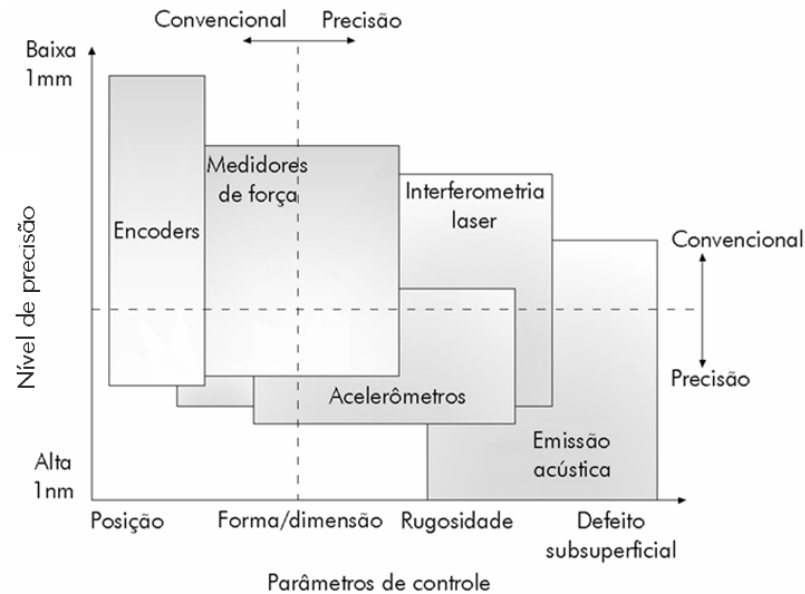


Figura 2.32 - Frequências do sinal de corte e ruído e eficiência do sensor [55].

### 2.7.1. Emissão acústica

A emissão acústica – EA – é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal transiente em corpos sólidos. Ela ocorre de modo semelhante em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo – impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica – ou uma fonte interna – deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros [51, 52].

A sensibilidade da emissão acústica em processos abrasivos e as interações de atrito inerentes são conhecidas há algum tempo [33[33, 44]. A medida do sinal de emissão acústica é significativamente mais sensível às variações das condições de retificação do que medidas de força e potência, sendo uma boa técnica para o monitoramento “on-line” do processo [56, 57].

A liberação de energia de sinal de EA consiste em rearranjos atômicos que ocorrem durante a deformação ou a formação de trincas. Tais rearranjos produzem ondas elásticas que propagam através do material, as quais produzem deslocamentos na sua superfície que podem ser detectadas por acelerômetros piezelétricos [45]. Estes transformam a vibração em uma carga elétrica. Esta carga elétrica é pré-amplificada e transformada em uma tensão proporcional à carga. Os mecanismos mais importantes que geram EA são [55, 58]:

- A fratura de cristais,
- A nucleação e crescimento de trincas,
- Os mecanismos de formação de discordâncias,
- As fraturas de inclusões,
- As transformações de fase em sólidos e
- As descargas elétricas

A EA é fortemente dependente dos parâmetros de processo. Como fatores de influência, pode-se citar: a taxa de retificação, a velocidade de retificação, a largura de contato entre rebolo e peça e as características do material de peça, tais como módulo de elasticidade, estrutura, composição e porosidade.

A faixa de frequência de interesse na EA está na faixa dos 50 kHz aos 1000kHz, o que supera a faixa de frequência de muitos ruídos advindos de fontes exteriores ao processo em análise. Por isto, é um método sensível e adequado para o monitoramento do processo de retificação [59]

### ***Tipos de sinais de emissão acústica***

Os sinais de EA são de dois tipos: pulsos (*burst*) e contínuos – Figura 2.33. Os pulsos são sinais de alta frequência e grande amplitude, que ocorrem de forma isolada. Cada pulso apresenta um amortecimento, função das características do material. A superposição dos pulsos leva a uma superposição de sinais, tornando a interpretação complexa.

Os sinais contínuos são decorrentes de processos contínuos – trefilação – ou da superposição de pulsos muito próximos como na retificação, no qual vários gumes atuam simultaneamente. A frequência dos pulsos é tratada diferentemente da frequência do sinal de emissão acústica. Pulsos de baixa frequência, oriundos de fontes externas são facilmente subtraídos do sinal, permitindo uma interpretação do sinal coerente com o processo em análise. A frequência do sinal de EA geralmente se situa acima de 50 Hz.

A ocorrência de deformações plásticas e de trincas leva a sinais com frequências até a faixa de 1 a 1,2 MHz. Como a frequência de ocorrências causadas pela deformação plástica e pela formação de trincas é muito grande e apesar de cada sinal isolado também sofrer um amortecimento, a superposição dos mesmos leva a um sinal mais uniforme. A interpretação dos sinais de EA exige o emprego de ferramentas matemáticas, com FFT e correlatos, bem como, ferramentas estatísticas.



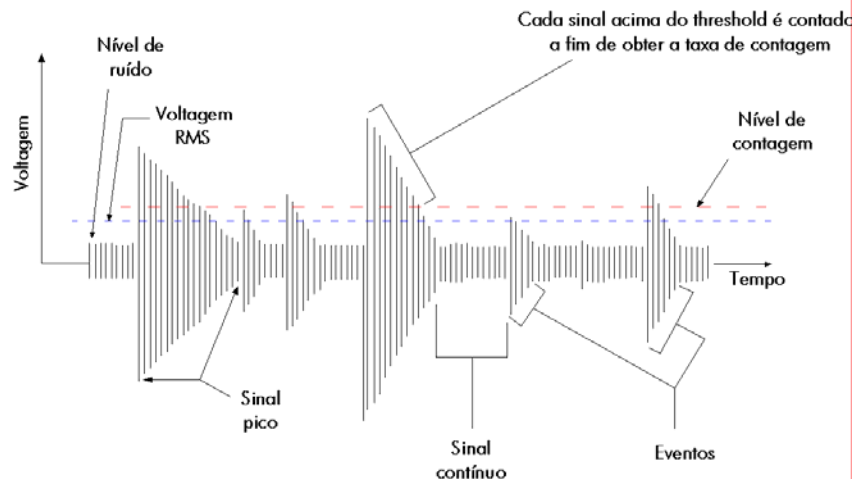


Figura 2.33 – Tipos de sinais de EA [58].

Na usinagem, as principais fontes de geração de EA são – Figura 2.34 a zona primária de deformação (zona de cisalhamento); a zona secundária de deformação (interface ferramenta-cavaco); e a zona terciária (atrito entre flanco da ferramenta e superfície usinada). As fontes secundárias são: a quebra do cavaco e enrolamento de cavaco contínuo na face da ferramenta ou peça; e lascamentos ou quebras da ferramenta.

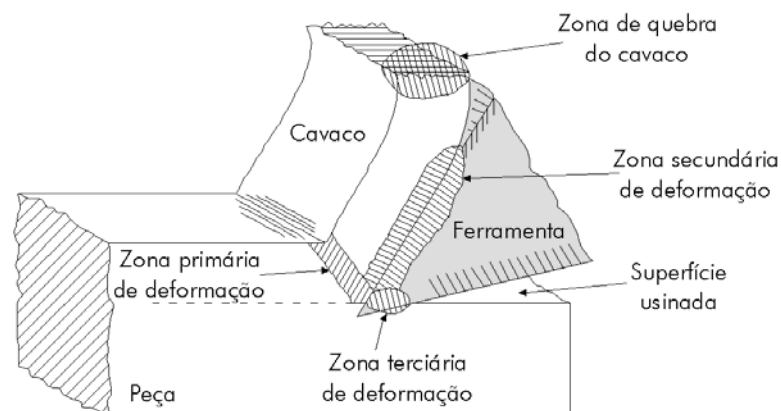


Figura 2.34 – Fontes de geração de EA [59].

### *Características das ondas acústicas*

Os sinais de EA são transmitidos através do meio. As características do meio são responsáveis pelas propriedades da onda acústica transmitida. A velocidade de propagação da onda é determinada pelo seu módulo de elasticidade e pela densidade do material.

Quanto maior a força atômica entre os átomos – módulo de elasticidade –, maior será a velocidade de propagação da onda, já que os átomos estão mais próximos uns dos outros. Quanto maior a massa atômica – densidade –, maior a força necessária para "movimentar" esses átomos, o que diminui a velocidade de propagação da onda.

### ***Características dos sinais***

Os sinais de EA e as ondas acústicas que o geraram possuem a mesma característica aleatória. O espectro de frequência e a distribuição da amplitude das ondas dependem basicamente da natureza da fonte, do meio de transmissão e do sistema de detecção. Desta maneira, uma análise aprofundada da onda tem potencial para revelar detalhes referentes à fonte que está causando a EA.

Como já foi dito, o sinal de EA apresenta duas formas distintas: um sinal contínuo e um pulso (*burst*). O sinal contínuo apresenta semelhança com um ruído de fundo, enquanto que o pulsado é um evento transiente bem definido, que oferece mais características para análise. Tal diferença influencia a análise do sinal e a distinção é realizada visualmente sem maiores problemas.

Na análise de um sinal de EA, as características mais importantes são: taxa de repetição média, amplitude individual de pulso, energia de pulsos e conteúdo de frequência – tanto pulsos individuais quanto conteúdo médio. Para o pulso, há ainda outras importantes características: o tempo de crescimento (*rise time*) do pulso, a constante de decaimento e o comprimento do sinal.

O *rise time* é definido como o intervalo de tempo compreendido entre o início do sinal até o pico, e é influenciado pela dispersão da onda acústica e, portanto, pela distância do sensor da fonte de EA.

É difícil a determinação da duração do sinal, dado que ele se "mistura" lentamente ao ruído de fundo. Tal duração é dependente tanto da amplitude do sinal quanto da taxa de decaimento. A taxa de decaimento é, no entanto e em geral, constante para um dado material.

### ***Processamento dos sinais de EA***

Durante a usinagem, uma mudança das variáveis de entrada de processo é acompanhada por aumento ou diminuição do nível de energia dos sinais de EA.

Devido às características dos sinais de EA, na sua análise são empregadas técnicas estatísticas e formas de tratamento de sinal, a fim de permitir a correta interpretação do sinal de EA. A Figura 2.35 auxilia no entendimento dos conceitos relacionados a tais técnicas, expressos a seguir [51]:

- Filtragem: consiste em extrair do sinal a característica física mais relacionada ao fenômeno, por meio de filtros de frequência.
- Retificação: transformação do sinal alternado com zero centrado para sinal contínuo com mínimo valor zero.
- RMS – *Root Mean Square*: faz retificação do sinal e calcula a média quadrática em intervalos de tempo determinados, sendo um dos métodos mais significativos para analisar EA.
- FFT – *Fast Fourier Transformation*: a Transformada Rápida de Fourier transforma o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo analisar a frequência em que ocorre o fenômeno monitorado.
- Média e desvio-padrão: utilizados para determinar, respectivamente, o valor médio e a dispersão de um sinal medido. Tais características podem ser resumidas pelos momentos da distribuição ou derivadas. Uma distribuição é considerada completamente especificada quando todos os seus momentos são conhecidos. Entretanto, muitas distribuições podem ser adequadamente descritas pelos quatro primeiros momentos, sendo o primeiro sempre zero. O segundo momento da média é uma medida de dispersão; a variância e a raiz quadrada da variância é o desvio-padrão.
- Derivação: utilizada para detectar variações dinâmicas no sinal – máximos e mínimos.
- *Skewness*: está relacionado à assimetria de uma distribuição.
- *Kurtosis*: está relacionado à forma da área da distribuição, podendo ser achatada ou alongada em relação à distribuição normal.

Basicamente o processamento do sinal de EA consiste das seguintes etapas. Inicialmente, o sinal proveniente do sensor de EA é amplificado. Esse sinal é então condicionado em estágio de filtragem, com filtros passa-banda, para garantir uma razão sinal-ruído ótima, eliminando interferência de acionamentos de avanço, caixas de

redução, mancais e outros componentes. A partir desse ponto, somente o sinal referente à usinagem contínua no sistema [51].

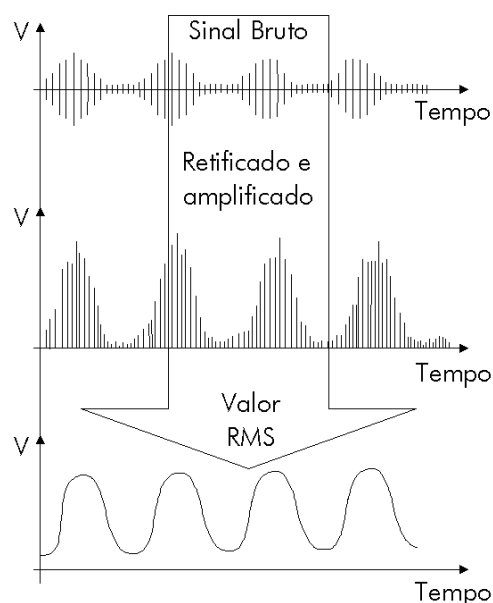


Figura 2.35 – Filtragem RMS sobre o sinal bruto de EA [51].

O sinal de EA já filtrado é então demodulado por meio de retificador e depois passa por filtro passa-baixa. O nível de saída resultante indica o estado do processo, sendo que um sinal condicionado dessa maneira pode ser transmitido sem interferência por distâncias que podem alcançar dezenas de metros no sistema de controle, uma vez que não contém altas frequências como no sinal bruto de EA.

As características mais importantes contidas no sinal de EA são: o nível de energia, o espectro e a distribuição de amplitude. O primeiro é representado por voltagem RMS, o segundo, pelos principais componentes de frequência do sinal e o terceiro, estatisticamente por funções de densidade e parâmetros estatísticos, como média, desvio padrão, *skew* e *kurtosis* [51, 52].

Durante a aquisição do sinal de EA, dependendo da taxa de amostragem utilizada, pode ocorrer um fenômeno chamado *aliasing* – Figura 2.36 – que aparece quando a taxa de amostragem é muito baixa, com conseqüente perda de informação. A frequência da taxa de amostragem deve ser, no mínimo, o dobro da Frequência de *Nyquist*, que corresponde à máxima frequência de interesse no sinal. A fim de prevenir esse fenômeno, deve-se utilizar um filtro passa-baixa no sistema de amplificação antes da digitalização do sinal, o qual pode ser precisamente analisado pela Análise de *Fourier*.

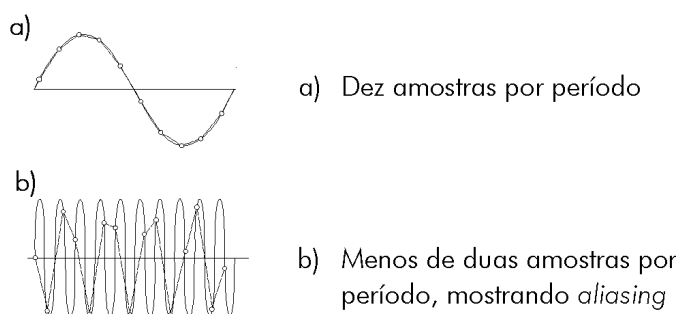


Figura 2.36 – Efeito da taxa de amostragem na digitalização dos sinais [51].

A aplicação desta técnica na manufatura gera como principais vantagens a não interferência no processo e a possibilidade de se monitorar diversos fenômenos ocorridos na usinagem, utilizando-se um único sensor.

### 2.7.2. Acoplamentos acústicos e sensores

A dispersão de um sinal de EA se dá em todas as direções. Por isto, o sensor deve ser fixado o mais próximo possível da fonte geradora do sinal. No caso da retificação, próximo à região de contato entre rebolo e peça [51, 52].

Para melhorar a transferência de energia do corpo no qual é gerado o sinal de emissão acústica para o transdutor, a interface entre o corpo e o transdutor deve ser adequada. Quanto mais rígido for o acoplamento, melhor será a transmissão do sinal. Na retificação, nem sempre é possível obter um bom acoplamento entre o corpo e o transdutor e se opta por uma solução de compromisso. Uma solução viável é manter um filme fluídico (líquido ou pastoso) entre o corpo e o transdutor [51].

Um sensor de EA é um dispositivo que gera sinal elétrico quando é estimulado por uma onda acústica. O sensor piezelétrico de EA é pouco intrusivo e de fácil instalação. Ele é especialmente projetado quanto à robustez, suportando a alta agressividade do meio. A escolha do sensor é crítica. Sensores baratos não apresentam linearidade sobre o espectro de frequência e são limitados na frequência máxima [54, 55, 56].

Os sensores de EA se baseiam em vários princípios físicos, como eletromagnéticos, capacitivos, magneto-restritivos e piezelétricos, sendo o último o mais utilizado.

A piezeletricidade consiste de cristais que não apresentam simetria dos seus centros de carga negativo e positivo, e assim possuem a capacidade de gerar carga elétrica quando submetidos a uma carga mecânica que varia com o tempo [53, 54].

Os cristais piezelétricos são transdutores elétricos ativos, dado que um único sinal de entrada, originado do sistema que se quer medir – sistema-fonte – é suficiente para que o transdutor gere um sinal de saída elétrico. Um cristal piezelétrico produz um sinal elétrico de saída quando experimenta uma mudança na carga a que está exposto e por isto, um transdutor piezelétrico não é adequado para medição de carga estática, pois neste caso, não há mudança, no decorrer do tempo, da carga a que está sujeito [53].

Um transdutor piezelétrico consiste de finas lâminas cortadas adequadamente em relação aos eixos do cristal, para dar a máxima resposta piezelétrica numa direção desejada, ao mesmo tempo com pouca ou nenhuma resposta em outras direções. Estas lâminas são arrumadas em uma pilha e são precedidas por uma mola. A coluna de quartzo assim formada gera um sinal elétrico da ordem de picocoulombs, diretamente proporcional à carga mecânica à qual a coluna está submetida [54].

### 3. Máquinas e equipamentos

A máquina-ferramenta, equipamentos, ferramentas e sistemas empregados na realização dos experimentos necessários a esta pesquisa são descritos a seguir.

#### 3.1. A máquina-ferramenta

A máquina-ferramenta empregada na realização dos ensaios de análise e medição dos erros de posicionamento é uma retificadora cilíndrica universal externa e interna, fabricada pela empresa ZEMA Zselics Ltda, modelo Pratika Flexa-600L – Figura 3.1.



Figura 3.1 – Retificadora CNC utilizada para a realização dos ensaios.

##### 3.1.1. Características gerais da máquina-ferramenta

A retificadora Flexa 600-L do LMP é equipada com um comando numérico Siemens 840D SINUMERIK, o qual tem capacidade de controle de até 31 eixos lineares ou rotativos. A Tabela 3.1 resume as características da mesma. A potência de acionamento é de 5,6 kW (7,5HP), e a velocidade periférica limite do rebolo é de 100 m/s. O mancal do rebolo é hidrostático.

O carro porta rebolo está montado sobre guias cruzadas hidrostáticas nos eixos X e Z – transversal e longitudinal, respectivamente. O carro se move sobre as guias, auxiliado por fusos de esferas recirculantes de alta precisão servo comandadas por um sistema eletro-eletrônico rotativo com motores *brush Less* e com um sistema de medição absoluto. Entre a mesa cruzada e o porta-rebolo, um endentamento *Hirth* permite um giro escalonado do porta-rebolo em torno do eixo Y, com uma divisão angular de 1°. O eixo Y é normal ao plano XZ – Figura 3.2.

Tabela 3.1 – Especificações da Máquina-ferramenta.

Fabricante	Zema Zselics Ltda.
Modelo	Pratika Flexa 600L
Potência de Acionamento do Mancal	5,6kW (7,5HP)
Comando Numérico	Siemens 840D
Velocidade de Corte Máxima	100 m/s
Diâmetro Máximo do Rebolo	406 mm
Largura Máxima do Rebolo	50 mm
Diâmetro Máximo da Peça	275 mm
Comprimento Máximo da Peça	600 mm
Incremento Mínimo	1 $\mu$ m

O maior comprimento de peça é de 600 mm e o diâmetro máximo é de 275 mm. O rebolo é limitado ao diâmetro de 406 mm e largura de 50 mm. O *layout* da parte interna da retificadora é mostrado na Figura 3.2. A peça pode ser presa entre pontas ou apenas no cabeçote acionado, por pinças ou placa de castanhas.

Os pontos de apoio são fixos – não executam rotação –, garantindo um batimento mínimo da peça. A rotação da peça é proporcionada por um arrastador fixo à mesma somado a um dispositivo acionado, com rotação variável, concêntrico ao ponto. A contra-ponta permite um deslocamento axial e a pressão de fixação da peça é controlada por mola.

As pontas podem ser deslocadas sobre a mesa longitudinal do sistema porta-peça e fixas sobre esta, para uma distância adequada para a retificação da peça. A mesa porta-peça pode ser girada em torno do eixo  $Y_2$  para permitir a retificação de cones com pequena conicidade e para a correção do paralelismo entre os eixos Z e  $Z_1$  da mesa porta-peça. O disco dressador diamantado está montado lateralmente na contra-ponta, na mesma altura dos eixos da peça e do rebolo.



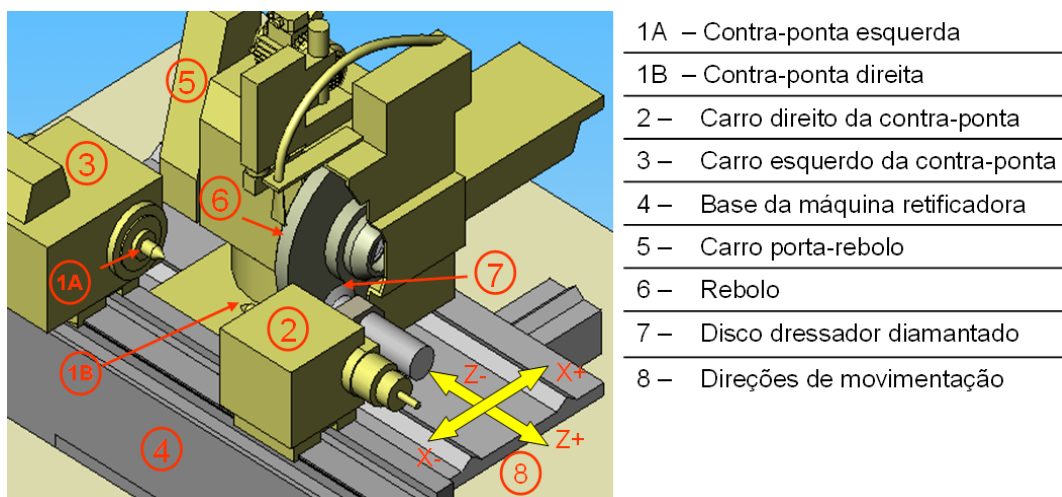


Figura 3.2 – Layout do sistema de guias da máquina ferramenta.

A máquina dispõe ainda de um sistema eletrônico para posicionamento manual do carro porta-rebolo, com resolução de posicionamento nominal de 1  $\mu\text{m}$ . Este sistema não visa ser utilizado em operações de usinagem, mas apenas de posicionamento e é composto pelos seguintes elementos:

- Um volante com posições angulares indexadas, localizado no painel de controle do CNC da máquina;
- Chaves seletoras da direção de movimentação do carro porta-rebolo em X ou Z; e
- Chaves seletoras do avanço por posição angular indexada do volante, avanço este que pode ser de 1, 10 ou 100  $\mu\text{m}$ .

### 3.1.2. Sistemas de monitoramento da EA

A máquina dispõe de dois sistemas de emissão acústica – Figura 3.3. O sistema EA Sensis, integrado pelo fabricante à máquina-ferramenta, monitora o processo e permite interrompê-lo para limites pré-estabelecidos.

O sistema EA Dittel foi fornecido juntamente com o sistema de dressamento rotativo da empresa Dr. Kaiser. O sistema foi integrado à máquina-ferramenta, e permite detectar o toque entre o rebolo e o disco dressador com mais sensibilidade que o sistema da empresa Sensis.

Ambos os sistemas dispõem visores que permitem o acompanhamento dos valores medidos e de interfaces para a entrada de dados, que tornam possível o estabelecimento

dos limites do monitoramento. O conversor de frequência mostrado na Figura 3.3 é empregado no acionamento do sistema de dressamento, o qual é descrito no item 3.1.6.



Figura 3.3 – Sistemas EA Dittel e Sensis e inversor de frequências do sistema de dressamento.

O SISEA – sistema de medição do erro de posicionamento do carro porta-rebolo baseado em sinais de emissão acústica e no sistema de medição intrínseco da máquina-ferramenta – faz uso do sistema de detecção de sinais da DITTEL.

### 3.1.3. Sistema hidráulico

O sistema hidráulico é acionado por um motor trifásico de 1,4 kW (2 CV), com rotação constante, acoplado a uma bomba hidráulica de palhetas, com pressão de saída regulável. A pressão limite é regulada por válvulas de alívio, cujas pressões são indicadas num multimanômetro.

O sistema hidráulico da retificadora tem a função de garantir o suprimento de óleo pressurizado nas guias lineares hidrostáticas, no mancal rotativo hidrostático e na contra ponta. O sistema é composto por um reservatório, bomba de palhetas, filtro e válvulas servo-acionadas. Um trocador de calor permite a retirada de calor do sistema hidráulico.

#### *Monitoramento da pressão*

O sistema hidráulico dispõe de pressostatos para monitoramento da pressão necessária nas guias e mancais hidrostáticos e na contra-ponta.

Segundo o fabricante, estes dispositivos não funcionam corretamente na ocorrência de pressões fora das faixas de valores estipuladas, mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Pressões de funcionamento do circuito hidráulico da Flexa 600-L.

Componente	Pressão [bar]
Bomba	5,0 a 5,4
Guias	2,5
Contra-ponta	2,0

Os pressostatos do sistema hidráulico impedem o funcionamento da máquina quando a pressão está fora dos limites estipulados.

#### ***Monitoramento da temperatura do reservatório de óleo***

A temperatura do reservatório de óleo –  $T_r$  – é medida com o auxílio de um termômetro de bulbo, imerso diretamente do tanque de óleo. Em tal termômetro, o líquido dilatante é o álcool etílico com corante vermelho. A faixa de medição do instrumento de medição é de 20 a 100 °C e a incerteza de medição –  $U$  – de 0,5 °C. O instrumento é calibrado de fábrica.

#### **3.1.4. Sistema de resfriamento do óleo hidráulico**

O sistema de resfriamento do circuito hidráulico é constituído por uma unidade *Chiller* e por um trocador de calor. O *Chiller* deve fornecer água de resfriamento a uma temperatura média de 15 °C, numa vazão de 0,1 l/s, segundo o fabricante da retificadora.

O aparelho é fabricado pela empresa POLAR WATER CHILLERS, modelo PA-15, com potência de 12 kW e capacidade nominal é de 15000 kcal/h. Em relação ao trocador de calor, ele é fabricado pela empresa APEMA, modelo TA.500.4.

#### ***Monitoramento da temperatura e da pressão da água***

Devido às recomendações do fabricante da máquina, para o monitoramento da temperatura e da vazão volumétrica da água de resfriamento, são empregados, respectivamente, um termômetro e um rotâmetro.

O termômetro empregado é digital, modelo TH-1000, fabricado pela Instrutemp. Seguem suas especificações técnicas:

- Escala de - 40 até + 199,9°C com resolução de 0.1°C;
- Escala de 200 até + 1000°C com resolução de 1°C; e
- Tipo de sensor: termopar tipo K.

O rotâmetro empregado é fabricado pela Applitech, modelo AP 500. Ele trabalha com vazões mínima e máxima de 50 e 500 l/h, respectivamente, quando trabalhando com um flutuador modelo SS 316, do mesmo fabricante.

### 3.1.5. Sistema lubrefrigerante

O sistema lubrefrigerante é composto por um reservatório de 250 litros de emulsão com filtro de papel. O nível de fluido lubrefrigerante sobre o filtro de papel é controlado por uma bóia que aciona automaticamente o avanço do papel microporoso.

O bombeamento do fluido lubrefrigerante pode ser feito alternadamente por um sistema de baixa pressão e grande vazão – TEXIUS, 1,8 kW, 1 estágio, 1,4 bar – ou por uma sistema de alta pressão – SCHNEIDER, 3,6 kW, 10 estágios, 10 bar – Figura 3.4.

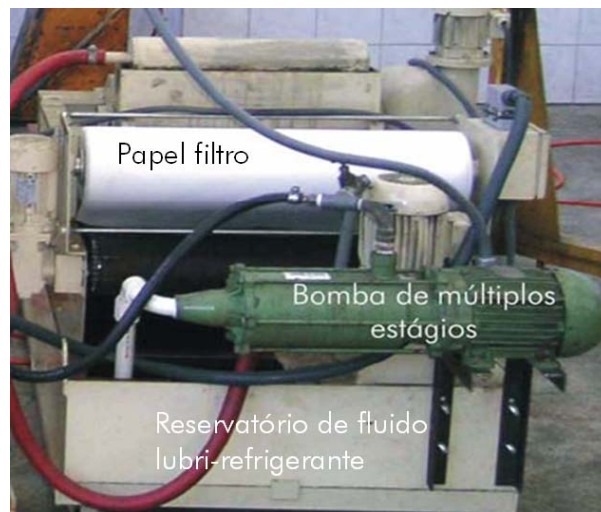


Figura 3.4 – Sistema de acionamento do fluido lubrefrigerante.

Ambos os sistemas são empregados para a lubrefrigeração e para a manutenção da limpeza das calhas da máquina-ferramenta. O fluido lubrefrigerante é coletado por um reservatório secundário sob a retificadora e bombeado para o separador magnético localizado sobre o filtro de papel do reservatório principal. O separador magnético despeja o fluido lubrefrigerante por gravidade no filtro de papel micro poroso.

### 3.1.6. Sistema de dressamento

O sistema de dressamento com disco acionado é fornecido pela *Dr.Kaiser Diamantwerkzeuge*, da Alemanha. O dressador para rebolos de CBN com ligante

cerâmico-vitrificado é constituído de diamante com ligante cerâmico-vitrificado – Tabela 3.3.

O disco diamantado, com 110 mm de diâmetro, é montado num cabeçote de acionamento que, através de um inversor de frequências – Figura 3.3 –, permite a variação da rotação do disco entre 1500 a 16000 rpm.

Tabela 3.3 – Disco diamantado empregado no dressamento do rebolo vitrificado [03].

Especificação completa do disco dressador	RI40 IN2515 110 0,8 6 40 10 TK D251 C150
Tipo de grão	Diamante
Perfil do disco dressador	Reto (Formato RI)
Diâmetro	110 mm
Largura da parte ativa	0,8 mm
Espessura do revestimento	6 mm
Diâmetro do furo de fixação	40 mm
Granulometria (tamanho do grão)	251 $\mu\text{m}$ (D251)
Tipo de ligante cerâmico-vitrificado	Sinterizado
Corpo do disco	Aço
Concentração volumétrica de d	C150

O desenho do disco, conforme folha de inspeção fornecida pela Dr. Kaiser, é apresentado no Anexo 2. A Figura 3.5 mostra os dispositivos empregados na fixação do cabeçote de acionamento do disco diamantado junto à máquina.

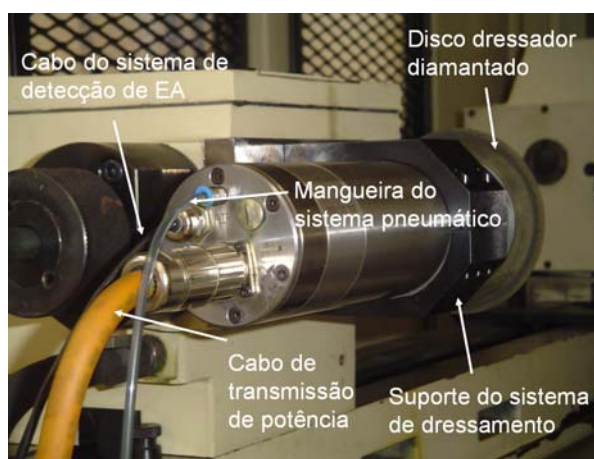


Figura 3.5 – Sistema de dressamento instalado na retificadora Flexa 600-L.

### 3.2. Rebolo

Para a realização dos ensaios foi utilizado um rebolo de Nitreto de Boro Cúbico – CBN – com ligante cerâmico-vítreo, fabricado pela empresa *Diamant Werkzeuge Hameln* – DWH –, fornecido ao Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP – pela Dr. Kaiser do Brasil.

A Tabela 3.4 apresenta as principais características deste rebolo. As indicações CB7 e 18B12 são códigos da própria DWH e referem-se, respectivamente, ao tipo de grão e ao tipo de ligante [03].

Tabela 3.4 - Características do rebolo de CBN com ligante vitrificado [03].

Especificação completa do rebolo	14A1 V B151 C150 CB7 18B12 ST
Tipo de grão	CBN (CB7)
Perfil do rebolo	Reto (14A1)
Diâmetro	400 mm
Largura do rebolo	30 mm
Espessura do revestimento	5 mm
Diâmetro do furo de fixação	100 mm (modificado para 127 mm)
Granulometria (tamanho do grão)	151 $\mu$ m (B151)
Tipo de ligante	Vitrificado (V) – 18B12
Corpo do rebolo	Aço
Concentração volumétrica de CBN	C150

O rebolo é montado no flange com um diâmetro de 127 mm. A Figura 3.6 ilustra o rebolo montado no flange e instalado no fuso da retificadora Flexa 600-L.

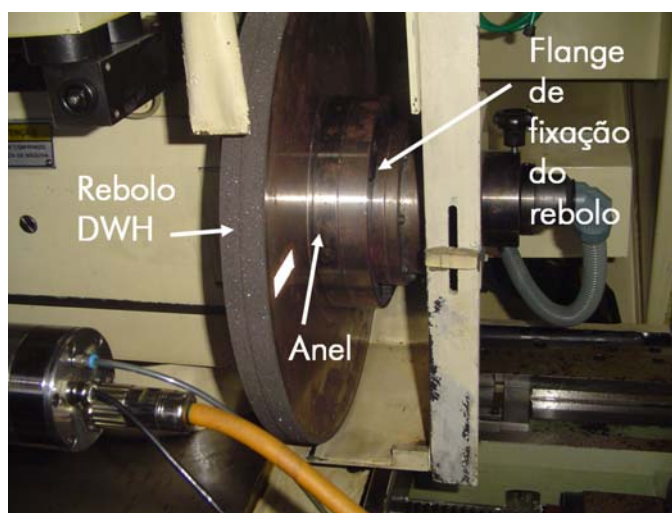


Figura 3.6 – Montagem do rebolo cerâmico-vítreo de CBN na retificadora ZEMA.

### 3.3. Superfície de referência - SR

As avaliações do erro do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo por EA e do tempo de aquecimento da máquina são feitas com o auxílio de uma superfície de referência, designada aqui por SR, montada na própria máquina-ferramenta, indicada na Figura 3.7. O SISEA faz uso desta superfície.

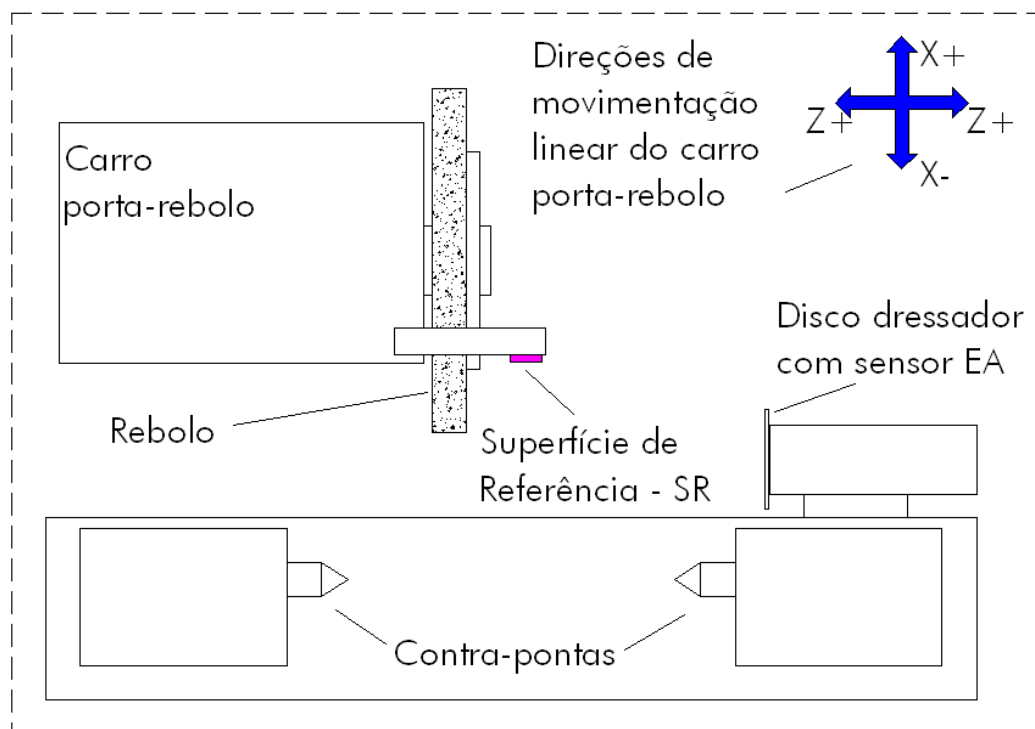


Figura 3.7 – Superfícies de referência para medições com EA.

Ela é empregada para as medições do erro de posicionamento na direção  $X$ , sendo tocada pela ferramenta de dressamento ao ser levada de encontro a esta. Este toque é detectado com o auxílio de um sensor de EA, montado no disco dressador. O toque é detectado com uma interferência de  $0,5 \mu\text{m}$ , o que garante o não arrancamento de material nem por parte do disco, nem por parte da superfície de referência.

A SR é empregada nas medições do erro de posicionamento na direção  $X$  ao longo da direção longitudinal  $Z$ . Esta superfície é também empregada na avaliação do tempo de aquecimento da retificadora.

A SR é gerada sobre uma pastilha do material abrasivo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , retificada, com o auxílio do sistema de dressamento, especificado no item 3.1.6. Pastilhas deste tipo são empregadas em ferramentas de brunimento ou em dispositivos de afiação de rebolos com ligantes resinóides [02].

A pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com 30 mm de comprimento – Figura 3.8 – é fixada na haste por meio de resina epóxi. A haste é fixada à máquina-ferramenta através de parafusos e a posição vertical da haste – eixo  $Y$ , normal ao plano  $(X, Z)$  – é coincidente com a altura do eixo do disco dressador. Uma vez colada, a pastilha é dressada com o auxílio do disco dressador, gerando assim a SR, paralela ao eixo  $Z$ .



Figura 3.8 – Pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para a superfície de referência.

### 3.4. *LASER interferométrico*

○ LASER interferométrico empregado nas medições ao presente trabalho – fabricante RENISHAW, modelo ML10 – possui código de registro RC 1903, junto à CERTI – Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras.

Tal equipamento apresenta uma incerteza de medição –  $U$  – de  $\pm 0,0003$  mm e o seu certificado de calibração junto ao INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – é o de código DIMCI 0010/2004, com validade até janeiro de 2008.

○ SISLASER – sistema de medição baseado em interferometria óptica – faz uso deste equipamento para a realização das medições padrão do erro de posicionamento do carro porta-rebolo da retificadora Flexa 600-L.



## 4. Grandezas medidas

As grandezas medidas, necessárias para a realização deste trabalho são listadas a seguir:

- Erro de posicionamento em X ao longo de X com SISLASER –  $E_{p_{XL}}$ ,
- Erro de posicionamento em X ao longo de Z com SISEA –  $E_{p_Z}$ ,
- Tempo de *warm up* da máquina-ferramenta –  $t_w$ , e
- Temperatura do óleo do reservatório de óleo –  $T_R$ .

Na seqüência, são descritos os significados de tais grandezas e colocadas os motivos para a utilização das mesmas.

### 4.1. Erro de posicionamento – $E_p$

O erro de posicionamento é estimado com o auxílio de sistema de medição por LASER, baseado em interferometria óptica (SISLASER).

A variável  $E_p$  expressa a diferença obtida no posicionamento do carro porta rebolo, para uma determinada coordenada (X, Z), conforme direções de movimentação indicadas na Figura 3.2, em relação a uma posição tomada como referência.

#### 4.1.1. Erro de posicionamento ao longo de X com SISLASER – $E_{p_{XL}}$

Corresponde à diferença entre o posicionamento do carro porta-rebolo em duas operações de posicionamento consecutivas, num mesmo sentido de movimentação do carro porta-rebolo. Tal sentido de movimentação pode ser positivo ou negativo, conforme Figura 3.2.

O erro de posicionamento medido com o SISLASER é o método padrão de medição indicado pela norma ISO 230-2. Os resultados obtidos com o mesmo são adotados neste trabalho como o parâmetro de referência para os ensaios com EA. A qualidade das medições obtidas por EA é tanto melhor quanto mais próximos forem os valores obtidos daqueles gerados pelo SISLASER.

O erro de posicionamento medido com o SISLASER, apesar de possibilitar grande precisão, é moroso e de custo elevado, sendo inviável a sua aplicação em chão de fábrica, quando o objetivo do levantamento do erro de posicionamento for a compensação do erro em processo.

#### 4.1.2. Erro de posicionamento ao longo de Z com SISEA – $Ep_z$

O erro de posicionamento do carro porta-rebolo na direção X, ao longo do eixo Z é medido com o auxílio do SISEA e da Superfície de referência - SR, citada no item 3.3. O objetivo das medições ao longo da direção longitudinal Z é demonstrar que é possível a análise do erro de posicionamento com SISEA, para diferentes valores de coordenada longitudinal Z.

#### 4.2. Tempo de *warm up* – $t_w$ – e da temperatura do reservatório – $T_R$

O tempo de *warm up* –  $t_w$  – é o tempo de aquecimento da máquina-ferramenta e corresponde ao tempo decorrido entre o estado da máquina desligada e fria até o momento em que a mesma entra “em regime”.

O termo “em regime” refere-se ao estado de funcionamento da máquina retificadora no qual a taxa de energia entregue à máquina é igual à taxa de energia por ela dissipada, em se considerando a máquina como um único volume de controle [35, 36, 37].

Quanto maior a proximidade do estado de funcionamento da máquina do seu estado de regime, menores as taxas de variação da temperatura do reservatório do óleo –  $T_R$  – e do erro de posicionamento na direção X, ao longo de Z –  $Ep_z$  – medido com o auxílio da Superfície SR. Por isto, o tempo de *warm up* é avaliado com a observação da evolução no tempo, de  $T_R$  e de  $Ep_z$ .

Enquanto a máquina não estiver operando “em regime”, o seu comportamento não pode ser considerado adequado para a medição das demais grandezas mencionadas –  $Ep_{xL}$ ,  $Ep_z$ .

## 5. Planejamento experimental

A seguir são descritas as maneiras pelas quais as variáveis descritas no Capítulo 4 são medidas. Os resultados e a sua análise constam no Capítulo 6.

### 5.1. Medição do erro ao longo de X com SISLASER – $Ep_{XL}$

Para a determinação do erro de posicionamento do carro porta-rebolo ao longo da direção X, com base no SISLASER –  $Ep_{XL}$  –, é feita uma comparação entre o deslocamento na direção X indicado pelo comando numérico da máquina e o valor do deslocamento na mesma direção, captado pelo SISLASER.

Nos testes, o carro porta-rebolo é levado a assumir a posição de coordenadas iniciais  $(X, Z) = (370,000; 300,000)$ , com o auxílio do comando numérico. A partir destes valores iniciais, a coordenada Z é mantida constante e os valores de X, variados de sete em sete milímetros na direção negativa de X, gerando os onze pontos indicados na Tabela 5.1, de valores de posição de referência. Devido ao propósito deste trabalho, os valores de referência são adotados de forma aleatória. Eles também são tomados como valores de referência para os testes com o sistema baseado em EA, descrito no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 5.1 – Coordenadas de referência para os testes de repetitividade ao longo da direção transversal.

Posição	$X_i$ [mm]	Z [mm]
1	370,000	300,000
2	363,000	300,000
3	356,000	300,000
4	349,000	300,000
5	342,000	300,000
6	335,000	300,000
7	328,000	300,000
8	321,000	300,000
9	314,000	300,000
10	307,000	300,000
11	300,000	300,000

A Figura 5.1 é uma vista superior do layout dos experimentos com o SISLASER, considerados aqui como medições padrão do erro de posicionamento do carro porta-rebolo. O LASER interferométrico é alinhado paralelamente ao deslocamento do eixo X da máquina. Tal alinhamento, seguindo orientações da ISO 232-02, é realizado em se

adotando dois valores de referência: um inicial e um final, na direção em que serão realizadas as medições. Dentro da faixa de valores determinada pelos citados valores, estão aqueles nos quais serão realizadas as medições.

Feito o alinhamento, o espelho de reflexão parcial é fixado sobre o barramento das guias das contra-pontas e o de reflexão total, no carro porta-rebolo, que é movimentado ao longo da direção transversal X. As leituras são realizadas no mostrador do SISLASER, com resolução de  $\pm 0,0001$  mm.

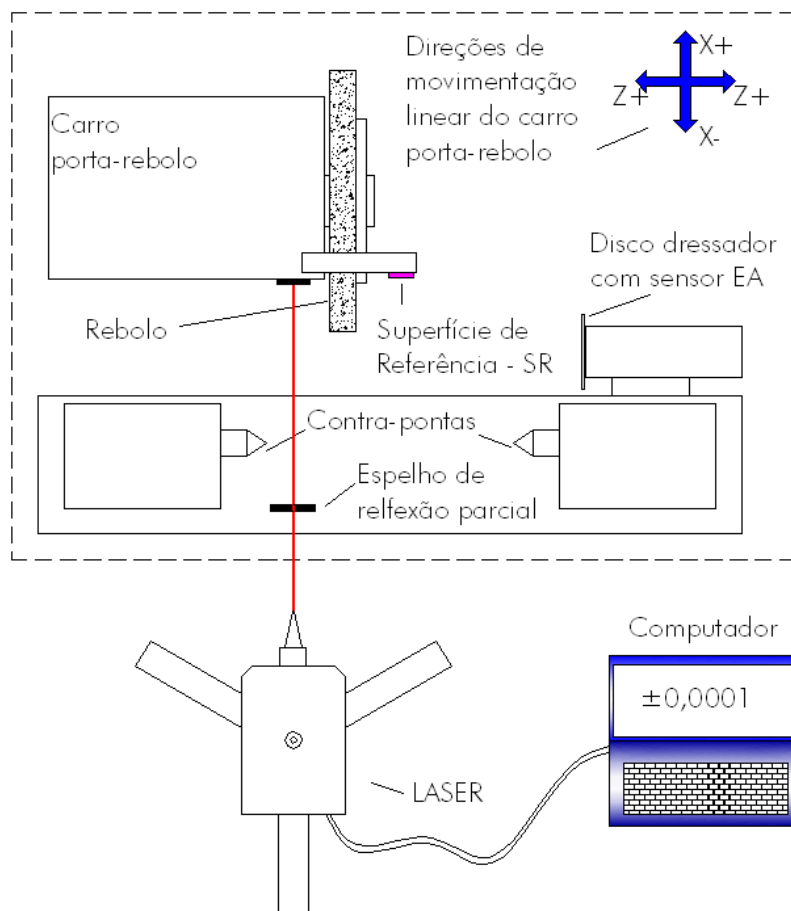


Figura 5.1 - Disposição do LASER para as medições de erro de posicionamento com o SISLASER.

Devido à histerese, o sentido de movimentação do carro porta-rebolo até as posições de tomada de dados é levado em consideração. Em cada um dos pontos de tomada de dados, é feita uma leitura baseada em interferometria óptica e anotado o sentido.

O valor do deslocamento em X é lido no mostrador do SISLASER. A temperatura e a umidade relativa do ar são levadas em consideração, nas leituras feitas com este

sistema. Os valores medidos durante os experimentos realizados são  $(30,0 \pm 2,5)$  °C e  $(70 \pm 10)$  %, para a temperatura e para a umidade relativa do ar, respectivamente. O SISLASER compensa os valores de umidade e de temperatura ambientes.

Não houve maiores dificuldades na montagem do equipamento, dado ter sido realizada com o auxílio de um técnico especializado na operação deste tipo de equipamento. Questionadas informações a respeito da sensibilidade do equipamento à influência externas de outras ordens, como vibrações, variações na rede externa de alimentação de energia etc., o técnico informou ser o equipamento de medição especialmente projetado para operar com estas fontes de erro de modo a contorná-las.

A Figura 5.2 ilustra o SISLASER real, montado junto à máquina retificadora. O nivelamento do LASER, necessário à uma medição correta, é conseguido com o nível de bolha indicado.

Para aumentar a confiabilidade dos dados gerados, são feitas cinco observações por ponto, em cada um dos sentidos de movimentação do carro porta-rebolo – positivo e negativo, conforme Figura 5.1. Os experimentos são realizados para duas, quatro, seis e oito horas de funcionamento da máquina. Cada bateria de ensaios não durou mais do que uma hora, tendo sido escolhidos os tempos para a tomada do erro de posicionamento de duas, quatro, seis e oito horas com base na experiência adquirida de outros projetos de pesquisa anteriormente realizados na retificadora Flexa 600-L [03, 16].

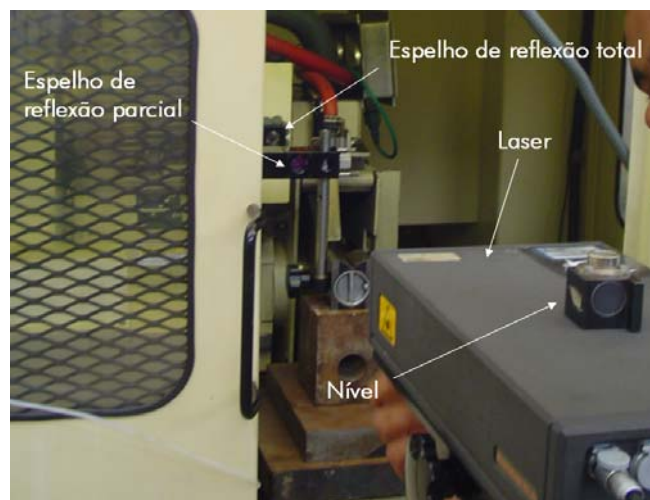


Figura 5.2 – Experimento de medição com o SISLASER.

## 5.2. Medição do erro ao longo de Z com SISEA – $E_{pz}$

Nas medições do erro de posicionamento na direção  $X$ , ao longo da direção  $Z$ , com o auxílio de  $SISEA - E_{pz}$ , a Superfície SR – Figura 3.7 – é levada de encontro ao disco dressador no qual está acoplado o sensor EA, que detecta o toque, estando o disco dressador acionado. O toque é indicado na tela de cristal líquido do sistema Dittel – Figura 3.3. Nas medições de  $E_{pz}$ , o carro porta-rebolo se move nas direções  $X$  e  $Z$ , indicadas na Figura 3.2.

Dado que a SR é gerada paralelamente ao eixo longitudinal  $Z$ , o valor da coordenada  $X$  para um toque disco dressador/SR é constante para qualquer valor  $Z_i$  ao longo da superfície.

O procedimento de medição de  $E_{pz}$  com a Superfície SR é ilustrada na Figura 5.3. O toque entre o disco dressador e a SR é feito com avanço manual do carro porta-rebolo sobre o disco, na direção  $X$ , sentido negativo.

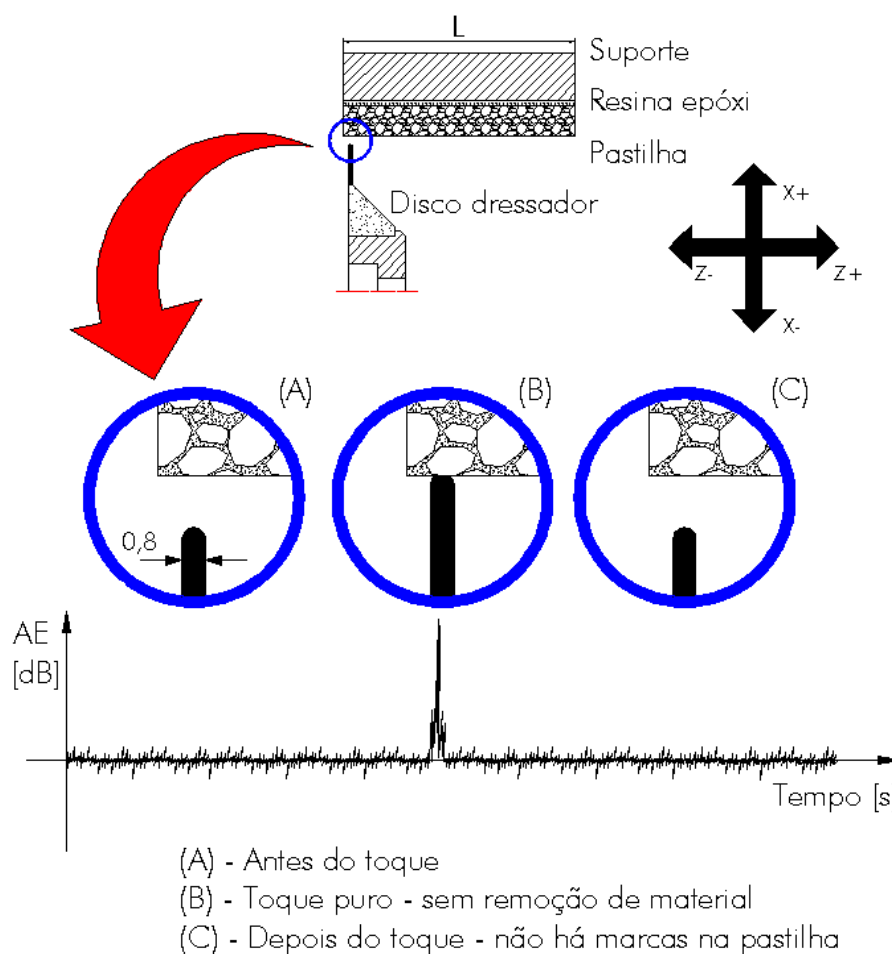


Figura 5.3 – Avaliação do erro de posicionamento com a referência na máquina –  $E_{pm}$ .

O primeiro toque é feito na parte esquerda da SR e os subseqüentes, com um deslocamento em Z igual à largura do disco dressador, de 0,8 mm – Figura 5.3(A) –, o que é conseguido com o deslocamento do carro porta-rebolo no sentido negativo da direção Z. Visa-se, deste modo, que o disco dressador tangencie sempre uma parte nova da Superfície SR.

No toque detectado por EA – Figura 5.3(B) –, o valor da coordenada  $Z_i$ , indicado no painel do CNC da retificadora, é registrado. Pelo fato da detecção do toque se dar em condições de toque puro, não há marcas na Superfície SR – Figura 5.3(C).

Devido ao deslocamento em Z, a Superfície SR apresenta uma vida finita, correspondente a um número de toques igual a razão entre o seu comprimento L – Figura 5.3 – e a espessura do disco, de 0,8 mm. Depois de terminada a sua vida, uma nova Superfície de Referência deve ser produzida na pastilha, conforme procedimento indicado no item 3.3.

A profundidade de penetração para a produção da nova SR deve ser tal que nenhum eventual vestígio dos toques produzidos na etapa anterior de teste seja visível. Obtida a nova superfície, um novo valor de X constante é verificado e então, é dado prosseguimento aos ensaios para o levantamento de novos valores de  $Z_i$ .

O valor de referência da coordenada X do toque disco dressador/Superfície SR é determinado pelo valor médio das medições feitas relativas à coordenada X de toque. O erro  $Ep_z$  de cada medida é o valor da diferença entre o valor médio e o valor da medida individual. Dada a natureza do experimento, é feita uma única observação por ponto de medição do toque disco dressador/Superfície 1.

### 5.3. Tempo de *warm up* – $t_w$

O tempo de *warm up* –  $t_w$  – é analisado pelos comportamentos temporais das seguintes grandezas:

- Temperatura do reservatório de óleo –  $T_R$ ,
- Erro de posicionamento  $Ep_z$ , e
- Erro de posicionamento  $Ep_{XL}$

### 5.3.1. Determinação de $t_w$ pela análise de $T_R$

Antes do acionamento da máquina, um termômetro – de bulbo e com álcool como líquido dilatante – é introduzido no reservatório do óleo hidráulico, para a medição de  $T_R$  inicial. Após um tempo de espera de dez minutos – para o termômetro entrar em equilíbrio térmico com o óleo do tanque –, é feita a leitura da temperatura indicada no termômetro –  $T_R$  – e registrado o horário da mesma.

O intervalo de tempo para as leituras subseqüentes de  $t_w$  é também de dez minutos. Neste período, a máquina permanece ligada, com o rebolo girando e movimentação linear do carro porta-rebolo nas direções transversal e longitudinal. As tomadas de tempo são feitas enquanto a  $T_R$  não estabilizar.

São feitas cinco repetições deste procedimento, para aferir maior confiabilidade aos resultados.

### 5.3.2. Determinação do $t_w$ pela análise de $Ep_z$

A determinação do tempo de *warm up* é feita também pela análise do comportamento do erro de posicionamento na direção X, ao longo da direção Z com o e com o SISEA e o auxílio da Superfície SR.

Por esta análise, o tempo de *warm up* corresponde ao tempo necessário para tornar-se estável no tempo, a ordem de grandeza dos erros de posicionamento na direção longitudinal, medidos por EA –  $Ep_z$ .

Apesar de ser possível somente uma medição para cada valor de Z, é possível a geração de pontos em intervalos de tempo semelhantes a partir do estado de máquina desligada. Deste modo, são gerados cinco pontos para cada valor de intervalo de tempo na avaliação do tempo de *warm up* através do comportamento temporal de  $Ep_z$ .



## 6. Apresentação e análise dos resultados

A seguir são apresentados os resultados obtidos, com o emprego da metodologia descrita no capítulo 5, referentes às medições das grandezas citadas no capítulo 4.

Os resultados medidos são dispostos na forma de gráficos e é feita uma análise relativa ao seu significado. Os valores dos coeficientes *t* de Student adotados são obtidos a partir de Johnson [60]. Adota-se, como base para os cálculos dos intervalos de confiança dos gráficos, uma confiabilidade de 95% ( $\alpha = 0,5$ ) [60, 61].

### 6.1. O erro de posicionamento $Ep_{XL}$

O erro de posicionamento na direção *X*, medido com o SISLASER é analisado sob dois aspectos:

- O comportamento temporal de  $Ep_{XL}$  e
- O comportamento médio de  $Ep_{XL}$ .

A análise temporal visa fortalecer os resultados relativos ao tempo de *warm up* da máquina, discutidos no item 6.3 deste texto. O comportamento médio visa uma avaliação atemporal do erro  $Ep_{XL}$  e é calculado em função unicamente, de uma posição de referência.

O sistema de medição com SISLASER pode ser influenciado por vibrações externas. A providência tomada com relação este problema resume-se à não utilização das máquinas-ferramentas de ao redor da retificadora durante as medições de  $Ep_{XL}$ . A baixa dispersão dos resultados obtidos mostra que tal medida é acertada, devido à qualidade dos resultados obtidos, como visto a seguir, nos itens 6.1.1 e 6.1.2.

Não se pode afirmar, no entanto, que o uso das máquinas-ferramentas durante a realização das medições surtiria efeito sobre os resultados, pois não foram feitos ensaios nestas condições. Tal medida de precaução é recomendada pela ISO 230-2 [47].

#### 6.1.1. Comportamento $Ep_{XL}$ em função do tempo de funcionamento

O comportamento do erro de posicionamento do carro porta-rebolo em função do tempo de funcionamento da retificadora é monitorado para os tempos de funcionamento da máquina-ferramenta igual a duas, quatro, seis e oito horas.

Nos primeiros experimentos com SISLASER, realizados com duas horas de funcionamento da máquina, são adotadas cinco observações por ponto, como inicialmente planejado. Dada a boa repetitividade dos resultados gerados e buscando-se economia de tempo e custos, adota-se três observações por ponto, para os experimentos subseqüentes, realizados com quatro, seis e oito horas, sendo mantida a confiabilidade de 95% para todas as análises. As três observações por ponto, adotadas como padrão para os experimentos relativos a quatro, seis e oito horas, são satisfatórias, dado que os intervalos de confiança resultantes apresentam ordens de grandeza semelhantes àqueles referentes a duas horas.

Os dados referentes às medições com SISLASER podem ser visto no Anexo 3. Os gráficos referentes a duas horas de medição podem ser vistos na Figura 6.1 e os referentes às medições para quatro, seis e oito horas de funcionamento da máquina podem ser vistos no Anexo 4. Recomenda-se ao leitor a constatação de que as ordens de grandeza dos intervalos de confiança para duas, quatro, seis e oito horas, de fato, são equivalentes.

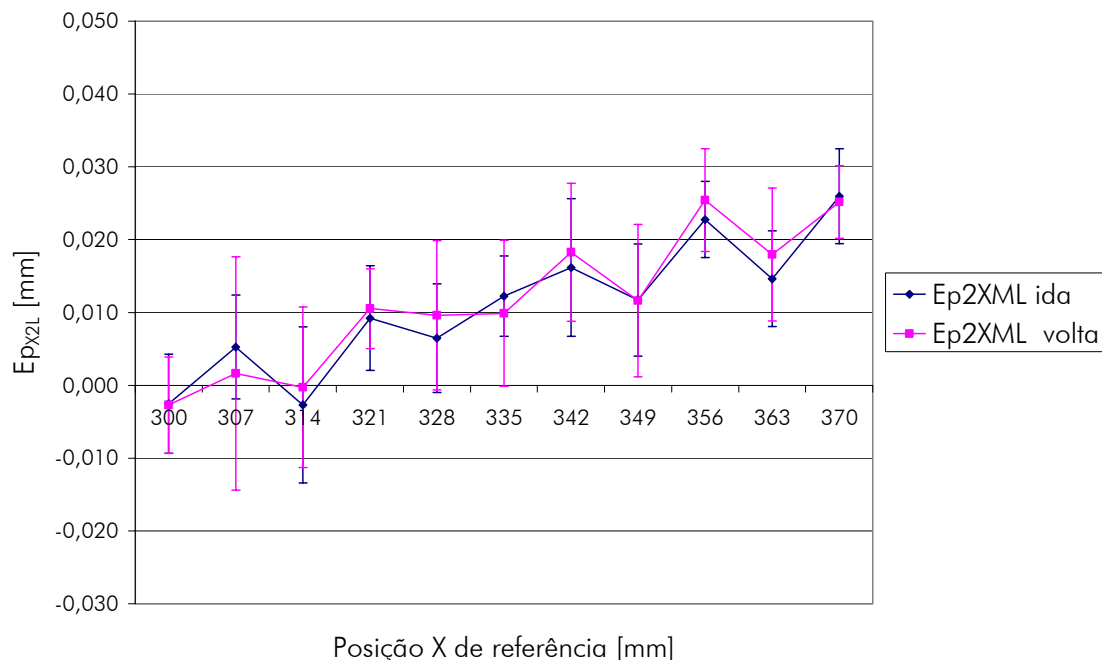


Figura 6.1 – Erro de posicionamento  $Ep_{XL}$  para duas horas de funcionamento.

Devido à possibilidade de histerese, o sentido de movimentação do carro porta rebolo ao longo de  $X$  é levado em conta. A Figura 6.1 mostra o gráfico do

comportamento de  $Ep_{XL}$  para um tempo de funcionamento da máquina igual a duas horas, nos sentidos positivo –  $Ep_{2XML\ idá}$  – e negativo –  $Ep_{2XML\ volta}$  – de movimentação. A mesma idéia é adotada nos gráficos mostrados no Anexo 4.

Dado o objetivo deste trabalho de pesquisa, de avaliar um sistema alternativo de medição do erro de posicionamento– SISEA –, considera-se que a ordem de grandeza da histerese observada nos gráficos das figuras, seja irrelevante. O que realmente importa é a proximidade dos resultados medidos com o sistema alternativo e os obtidos com o sistema padrão – SISLASER.

Analizando-se os dados do Anexo 3 e levando-se em consideração apenas a posição de referência, pode-se fazer uma análise com o dobro do número de observações. Isto pode ser feito dada a semelhança dos valores de  $Ep_{XL}$  mostrados nos gráficos da Figura 6.1 e do Anexo 4. Assim, são gerados os gráficos da Figura 6.2, que expressam o comportamento temporal médio de  $Ep_{XL}$  para diferentes tempos de funcionamento da máquina ferramenta.

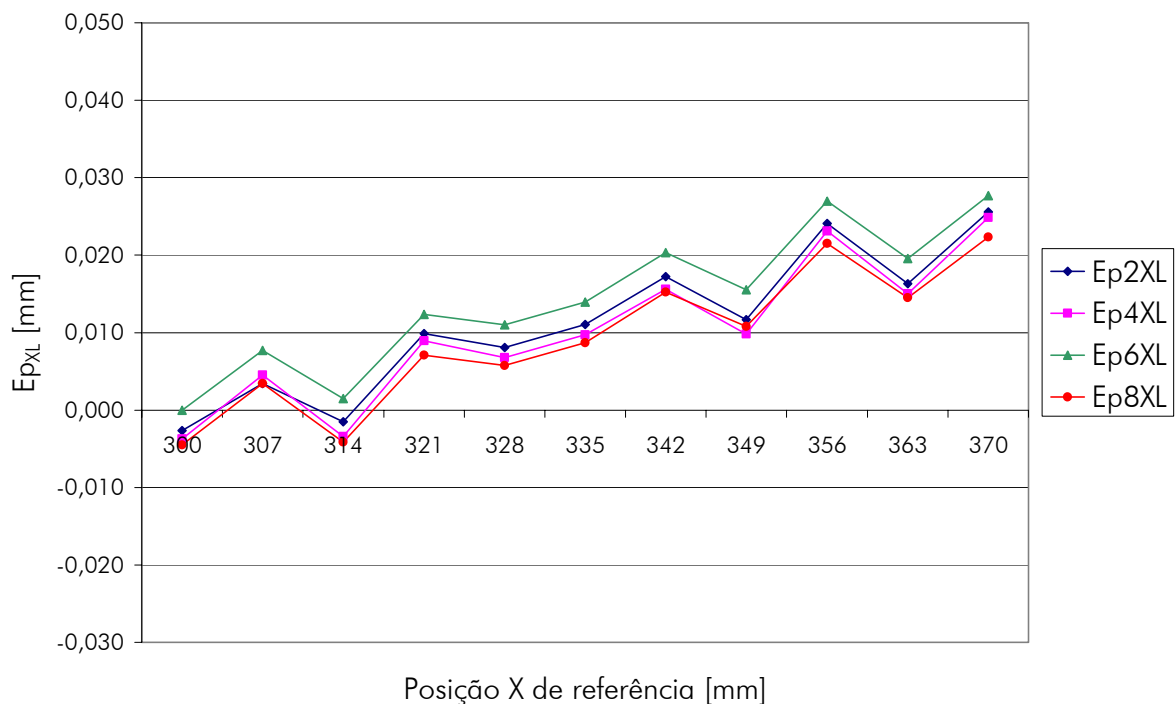


Figura 6.2 – Comportamento temporal médio de  $Ep_{XL}$ .

O comportamento de erro  $Ep_{XL}$ , para seis horas de funcionamento –  $Ep_{6XL}$  – é devido a uma falha no sistema de refrigeração da água de resfriamento ocorrida poucos

instantes antes do início das medições. Do gráfico de  $Ep_{6XL}$  fica clara a dependência dos resultados referentes à qualidade de posicionamento do carro porta-rebolo, em relação ao sistema de refrigeração da água de resfriamento – item 3.1.4.

Tomando-se as médias dos valores de  $Ep_{XL}$ , a partir dos valores medidos, sem se levar em conta o sentido de movimentação do carro porta-rebolo, podem ser estabelecidas as seguintes variáveis, para as posições (X, Z) de referência, indicada na Tabela 5.1:

- $\Delta_{2-4}$  – como a variação média de  $Ep_{XL}$  de duas para quatro horas;
- $\Delta_{4-6}$  – como a variação média de  $Ep_{XL}$  de quatro para seis horas;
- $\Delta_{4-8}$  – como a variação média de  $Ep_{XL}$  de quatro para oito horas; e
- $\Delta_{6-8}$  – como a variação média de  $Ep_{XL}$  de seis para oito horas.

Isto é feito para cada um dos onze pontos de referência e os resultados podem ser vistos no Anexo 5. Os gráficos resultantes desta análise são mostrados na Figura 6.3.

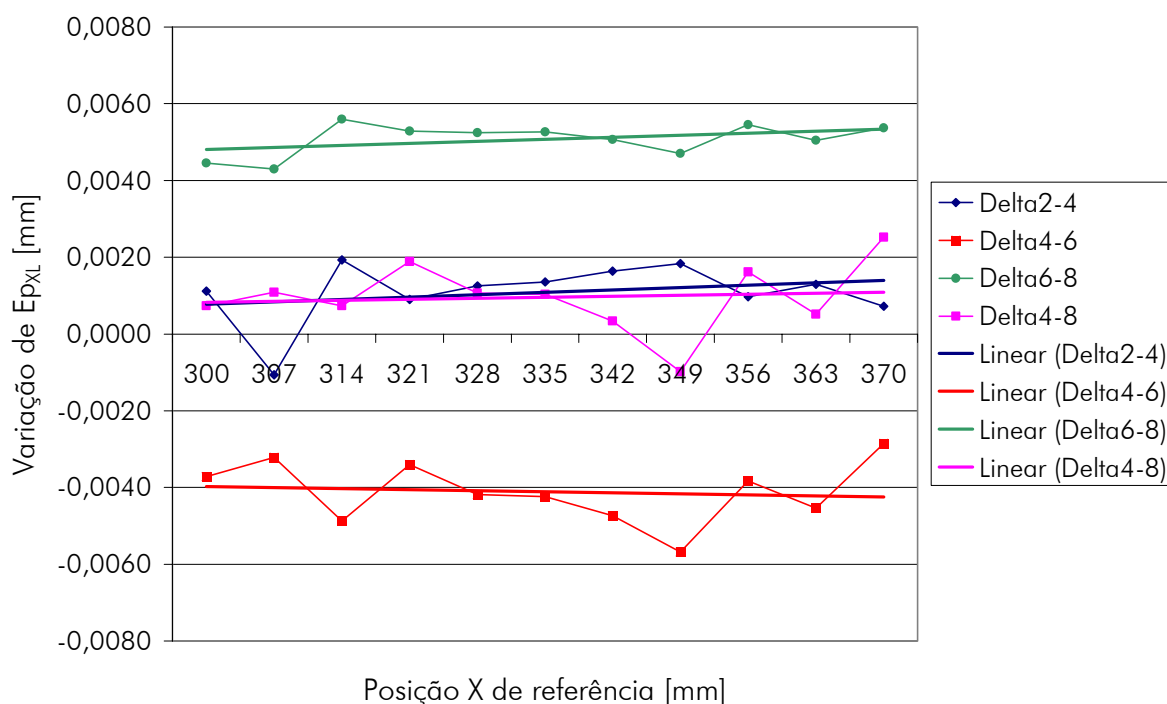


Figura 6.3 – Variação do erro  $Ep_{XL}$  em função do tempo decorrido de ensaio.

Nos gráficos da Figura 6.3, as linhas de tendência adicionadas por ajuste linear – Linear ( $\Delta_{2-4}$ ), Linear ( $\Delta_{4-6}$ ), Linear ( $\Delta_{6-8}$ ) e Linear ( $\Delta_{4-8}$ ) – auxiliam na visualização da variação média dos Deltas “entre si”. Num sistema termicamente

estabilizado, espera-se que tal variação seja nula. Na Figura 6.3, pode-se observar que a variação entre os valores de  $\Delta_{2-4}$  e  $\Delta_{4-8}$  é desprezível o que se justifica pelo fato do sistema de resfriamento da água ter conseguido estabilizar a temperatura do óleo hidráulico para os referidos Deltas.

Para os valores medidos de  $\Delta_{i-k}$ , com  $i$  ou  $k$  igual a seis, há uma variação potencialmente significativa entre os Deltas, pois nestas situações, a água de resfriamento, que é responsável por manter a temperatura do óleo do sistema hidráulico, parou de circular. Isto acarretou a dilatação térmica do óleo hidráulico e conseqüentemente, da estrutura da máquina-ferramenta. O efeito desta dilatação pode ser notado pelo aumento dos valores médios referentes a  $Ep_{6XL}$  – Figura 6.2 – e pelo aumento das variação entre os Deltas envolvendo  $Ep_{6XL}$ .

Numa situação prática de fabricação, o erro acarretado devido a tal falha do sistema de refrigeração seria da ordem de cinco a nove micrometros – diferenças médias aproximadas entre  $\Delta_{2-4}$  e  $\Delta_{4-6}$  e entre  $\Delta_{4-6}$  e  $\Delta_{6-8}$ , respectivamente.

Disto conclui-se que, uma vez operando em condições normais de resfriamento do óleo do sistema hidráulico, o comportamento temporal de  $Ep_{XL}$  apresenta uma variação média da ordem de um micrometro ou menos, o que a torna desprezível.

### 6.1.2. Comportamento médio de $Ep_{XL}$

O gráfico da Figura 6.4 expressa o comportamento médio do erro de posicionamento do carro porta-rebolo na direção X em função de posições de referência nesta direção. Ele é construído com base nos dados mostrados no Anexo 3.

Não são levados em conta os tempos de funcionamento da máquina-ferramenta e nem os sentidos de movimentação do carro porta-rebolo, o que permite a compilação de 28 observações por ponto de referência. Trabalha-se com a média de tais valores e a pequena dispersão dos dados por ponto de referência denota a possibilidade de tal análise.

Num comportamento otimizado, a linha de tendência mostrada no gráfico da Figura 6.4 seria constante e igual a zero, o que expressaria a inexistência de erro de posicionamento em função da posição de referência adotada.

O gráfico da Figura 6.4 expressa, no entanto, uma situação real, com uma variação média do erro de posicionamento da ordem de 28 micrometros para os valores

de referência adotados de  $X = 300,000$  até  $370,000$ , com um incremento em  $X$  de  $7,000$  mm – Tabela 5.1 – conforme mostra a linha de tendência obtida por ajuste linear dos valores medidos – Linear ( $Ep_{XML}$ ).

Tal variação do erro de posicionamento na direção transversal é característico do trecho medido –  $X = 300,000$  até  $X = 370,000$ , com  $Z = 300,000$  constante e incremento de  $7,000$  mm. Alterados os pontos de medição, um novo gráfico de  $Ep_{XML}$  em função da posição de referência é gerado.

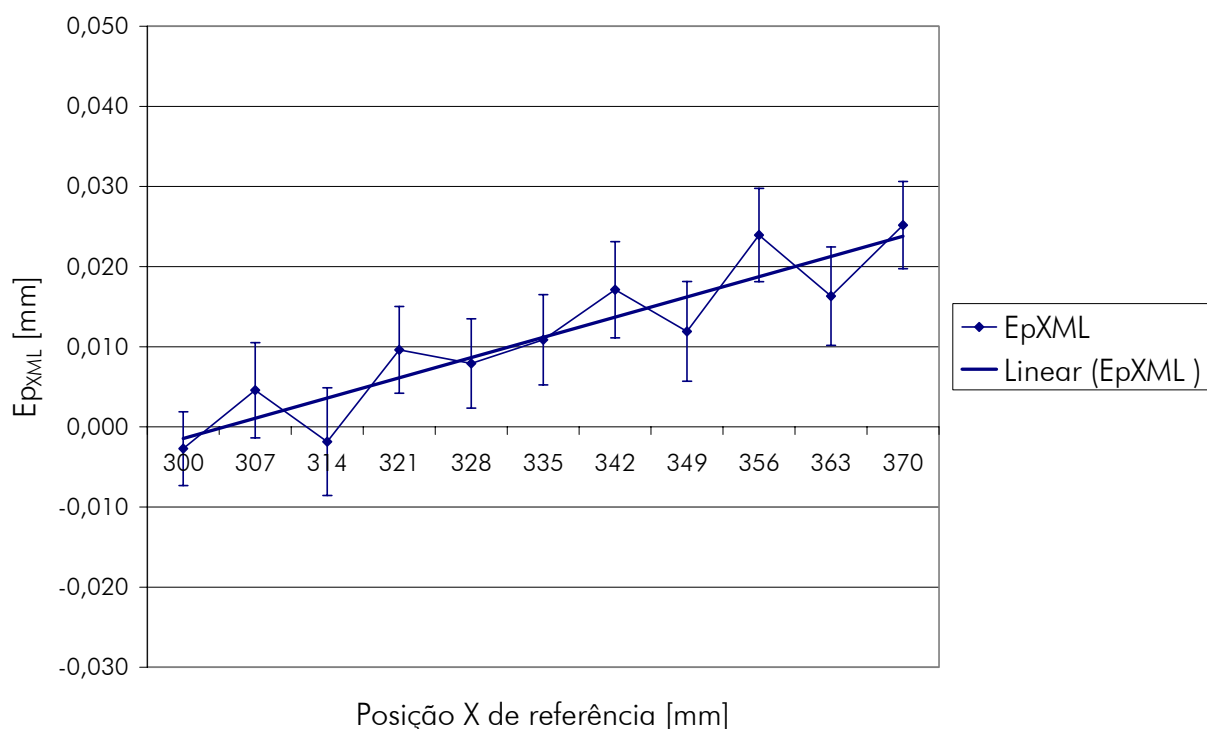


Figura 6.4 – Erro de posicionamento em função do deslocamento.

A Figura 6.4 expressa os valores padrão do erro de posicionamento do carro porta rebolo em função da posição de referência medido com o SISLASER.

Dado que o objetivo deste trabalho é a avaliação de tal erro com o sistema alternativo SISEA, baseado em sinais de emissão acústica, quanto maior a proximidade do erro medido com este modo alternativo em relação aos resultados obtidos com o modo padrão, melhor é a qualificação do sistema alternativo.

Os erros de posicionamento detectados com o sistema de medição baseado em interferometria óptica indicam existir um problema no sistema de posicionamento do

carro porta-rebolo da máquina-ferramenta ao qual deve ser dada atenção, dada a resolução da máquina.

Por fugir ao escopo deste trabalho, não será dada maior atenção a este problema. Cita-se, no entanto, que se deve dar atenção a esta característica da máquina para trabalhos futuros de pesquisa para os quais, a resolução do sistema de posicionamento seja importante. Como, nesta pesquisa, o foco é a comparação de resultados obtidos pelos dois sistemas, de medição, não serão tratados ou sugeridos modos de correção do problema detectado.

## 6.2. Repetitividade de posicionamento $Ep_z$

O erro de posicionamento do carro porta rebolo na direção X ao longo da direção longitudinal Z é medido com o auxílio do SISEA e da Superfície 1, indicada na Figura 3.7. Os resultados obtidos, referentes a  $Ep_z$  são mostrados no Anexo 6. Foram medidos cinco conjuntos de dados, de acordo com o dia de realização do ensaio.

No Anexo 6, cada conjunto de medições corresponde a um valor médio da coordenada X de toque disco-dressador/Superfície 1, o qual leva em conta todos os valores medidos no conjunto. O erro  $Ep_z$  correspondente a cada medição de um determinado conjunto é calculado como a diferença entre o valor da medição e o valor da média calculada para o conjunto a que pertence.

Sob esta análise, é gerado o gráfico da Figura 6.5. Segundo o gráfico, o erro  $Ep_z$  varia de  $\pm 2 \mu\text{m}$ . Cada observação foi feita uma única vez, dada a natureza da medição. Por isto, a incerteza associada a cada medição é alta. Neste sentido, e observando que a maioria dos resultados está dentro de uma faixa de valores bem definida, descarta-se variações maiores que  $1 \mu\text{m}$ , a partir do valor médio do segmentos designados seguir:

- Segmento A – de  $Z \approx 50,000 \text{ mm}$  até  $Z \approx 88,000 \text{ mm}$ ;
- Segmento B – de  $Z \approx 88,000 \text{ mm}$  até  $Z \approx 93,000 \text{ mm}$ ; e
- Segmento C – de  $Z \approx 93,000 \text{ mm}$  em diante

Durante as medições realizadas, correspondentes ao Segmento A, não houve problemas no sistema de resfriamento de óleo e os erros medidos resultantes foram da ordem de  $\pm 1 \mu\text{m}$  ao redor de uma média igual a zero.

Durante as medições de  $E_{pz}$  correspondentes aos Segmentos B e C, houve problemas no sistema de resfriamento. Os valores de  $E_{pz}$  medidos também oscilaram de aproximadamente  $\pm 1 \mu\text{m}$ , no entanto, ao redor de médias não nulas, iguais a  $+1 \mu\text{m}$  e  $-1 \mu\text{m}$ , para B e C, respectivamente. Isto colabora para a idéia de que o sistema de resfriamento do óleo hidráulico é de grande importância para a precisão de posicionamento do carro porta-rebolo da retificadora Flexa 600-L.

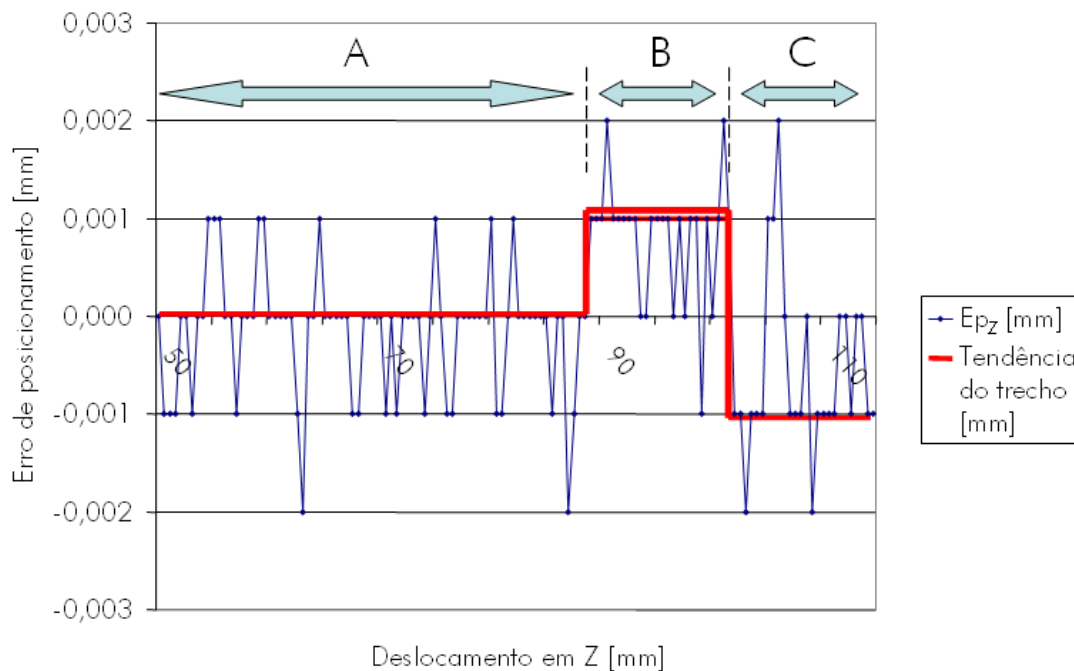


Figura 6.5 – Erro de posicionamento  $E_{pz}$  em função do deslocamento em longitudinal.

O sistema de medição de  $E_{pz}$  não mostrou-se capaz de conferir boa confiabilidade estatística aos resultados gerados, dada a inviabilidade da repetição dos ensaios realizados. Por isto, seu uso deve ser criterioso e os seus resultados questionados.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a capacidade ou não de medição do erro de posicionamento com o uso de SISEA, falta um parâmetro padrão de comparação para as medidas aqui realizadas. Conferir ou não qualidade às medições de  $E_{pz}$  depende da realização de novos ensaios com o SISLASER ou com padrões corporificados, para ao menos alguns dos valores de  $(X, Z)$  aqui adotados [37].

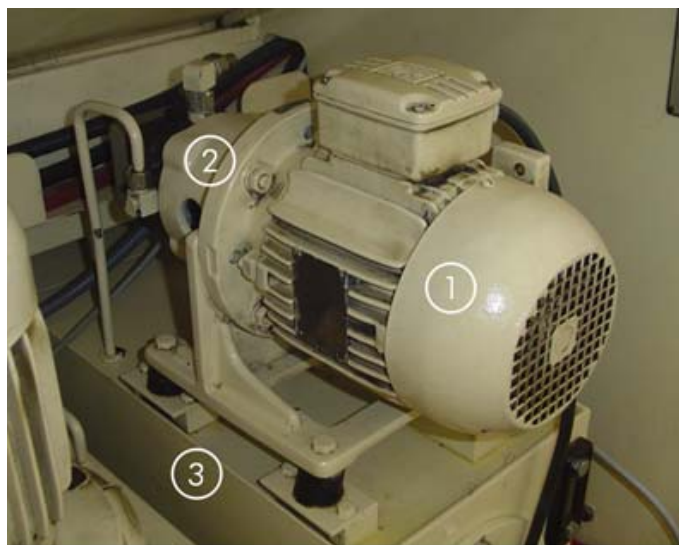
De qualquer modo, deve-se salientar que o fabricante da máquina fornece a mesma com uma resolução de posicionamento de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , valor este igual ao resultante aqui medido, se feitas as considerações propostas, relativas ao funcionamento do sistema de resfriamento do óleo hidráulico.



### 6.3. O tempo de *warm up*

Em máquinas retificadoras modernas, há uma orientação para que os reservatórios de óleo estejam situados em local arejado, o que não ocorre no caso da retificadora Flexa 600-L. Conforme elucidado no item 3.1.3, tal situação prejudica a estabilização térmica e aumenta o tempo de *warm up* da máquina.

Com a bomba sobre o reservatório, num ambiente relativamente confinado, como mostra a Figura 6.6, uma parcela significativa do calor gerado no sistema bomba-hidráulica/motor elétrico contribui para o aquecimento da máquina.



1 – Motor de acionamento da bomba

2 – Bomba do sistema hidráulico

3 – Reservatório do óleo do sistema hidráulico

Figura 6.6 – Sistema de acionamento do circuito hidráulico.

A orientação dos projetistas em termos de posicionamento neste tipo de reservatório é a de que o mesmo, durante o funcionamento das máquinas, esteja alocado numa posição em relação à retificadora, tal que seja favorecida a troca de calor entre o reservatório e o meio ambiente. A máquina retificadora não deve ser afetada pela dissipação de calor a partir do reservatório [35].

Com o acionamento da bomba do circuito hidráulico, parte da energia elétrica fornecida à bomba faz aumentar a pressão interna do circuito hidráulico. Uma outra parcela desta energia fornecida à bomba é dissipada na forma de calor para dentro no fluido do referido circuito. Esta parcela de energia aquece o óleo, pois faz aumentar os

choques entre as suas partículas internas. Há ainda uma parcela da energia fornecida à bomba que é dissipada para o meio externo.

Ao passar pelos dutos que levam às guias hidrostáticas, a energia do óleo pressurizado é em parte dissipada para meio ambiente, em parte, para a estrutura da máquina, causando aquecimento e dilatações nesta. Somente uma parcela da energia disponível no óleo é efetivamente empregada na lubrificação das guias.

Quando através das guias hidrostáticas da máquina-ferramenta, o óleo em movimentação é sujeito a mudanças bruscas de direção e a consideráveis variações de pressão. O atrito interno a nível molecular, sofrido pelo óleo nestas guias é intenso e o aquecimento provocado leva a uma dissipação de calor considerável para a estrutura da máquina, capaz de influenciar de modo significativo os resultados obtidos nas peças usinadas, em termos de precisão geométrica e de forma.

A geração de calor devido à movimentação do óleo é mais crítica na mancalização do rebolo. As demais fontes de geração de calor podem ser desconsideradas.

Valores das taxas de aquecimento em cada ponto do circuito hidráulico não fazem parte do escopo deste trabalho, no entanto a influência do aquecimento do óleo foi notável durante toda a realização desta pesquisa, ainda que o tenha sido feito de modo qualitativo.

As ações tomadas no sentido quantitativo foram:

- A análise do comportamento temporal do erro de posicionamento na direção  $X$ , com o auxílio do SISLASER –  $Ep_{XL}$  –, vista no item 6.1.1;
- O monitoramento da temperatura do reservatório de óleo –  $T_R$ : através da estabilização desta variável no tempo; e
- A monitoramento do erro de posicionamento na direção  $X$ , ao longo da direção  $Z$ , com o auxílio do sistema de EA –  $Ep_Z$ : através da estabilização de  $Ep_Z$  no tempo.

#### **6.3.1. Determinação do tempo de *warm up* em função de $T_R$**

Os gráficos da Figura 6.7 mostram o comportamento da  $T_R$  com o tempo de funcionamento da máquina. As curvas estão dispostas de acordo com o dia em que o ensaio foi realizado. Nota-se uma diferença significativa no que tange os valores iniciais

medidos devido às diferentes temperaturas ambiente encontradas nos diferentes dias dos ensaios. Os dados para a construção de tais gráficos constam no Anexo 7.

A viscosidade do óleo hidráulico, segundo o fabricante, não apresenta variações consideráveis para o intervalo de 30 a 34 °C. Deste modo, pela análise do gráfico da Figura 6.8, traçado com as médias do valores de  $T_R$  mostrados na Figura 6.7, é necessário um tempo de *warm up* de cerca de uma hora para trabalhos que envolvam tolerâncias mais estreitas em termos de precisão de dimensão e de acabamento de superfície.

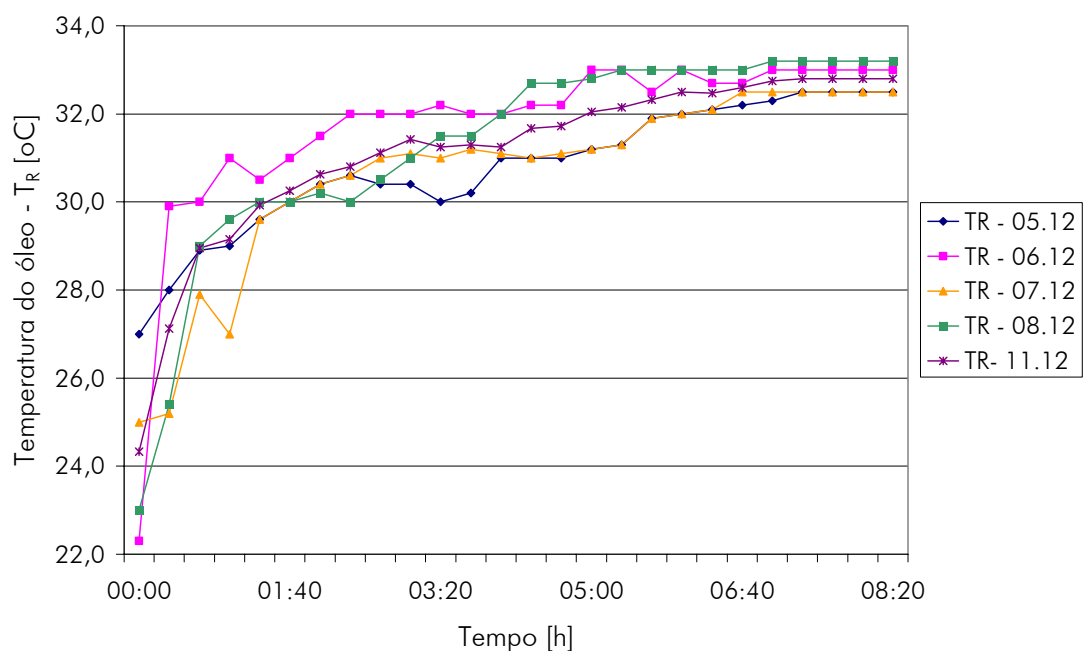


Figura 6.7 – Temperatura do óleo versus o tempo de funcionamento da retificadora.

Segundo o fabricante de máquina, o tempo de *warm up* corresponde a quarenta minutos de funcionamento em vazio, o que difere um pouco do valor aqui recomendado. Após o tempo indicado de uma hora, o óleo atinge a temperatura a partir da qual, o fabricante do óleo afirma não haver mais variação significativa de viscosidade.

Os intervalos de confiança mostrados na Figura 6.8, para 95% de confiabilidade, são maiores para valores iniciais do tempo, devido às diferentes temperaturas iniciais de funcionamento da máquina. A partir de um tempo decorrido de cerca de uma hora, os intervalos de confiança mostram-se menores, o que também denota uma maior

estabilidade para o comportamento da  $T_R$  para o tempo de um hora de *warm up* para a retificadora Flexa 600-L.

A ordem de grandeza dos intervalos de confiança referentes ao comportamento da temperatura do reservatório de óleo para o tempo maior ou igual a uma hora permite afirmar que o quantidade de cinco observações feitas para a construção do gráfico da Figura 6.8 é suficiente.

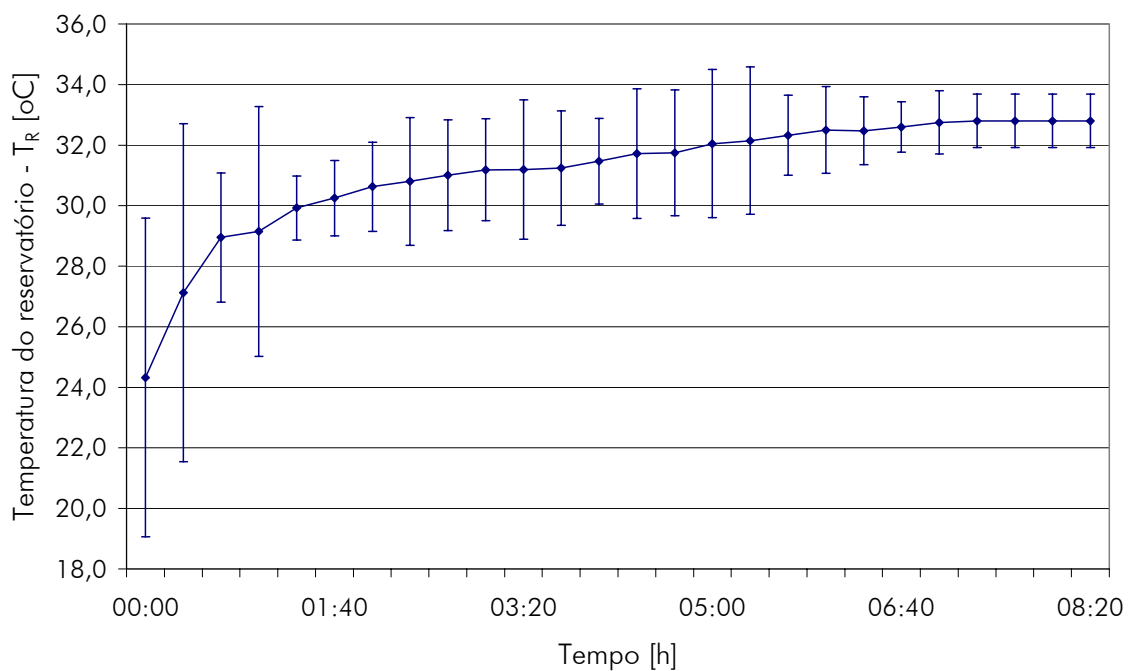


Figura 6.8 – Comportamento médio da temperatura do óleo do hidráulico.

Ainda no que se refere à quantidade de observações por ponto, recomenda-se um maior número de repetições para as medições da  $T_R$  referentes a um tempo decorrido de máquina ligada igual ou inferior a uma hora. Visa-se, assim, uma redução das ordens de grandeza dos intervalos de confiança relacionados a estes pontos.

Fazendo-se uma análise comparativa dos resultados do item 6.1.1 com os aqui levantados, conclui-se não ser possível a avaliação do tempo de *warm up* pelo comportamento de  $Ep_{XL}$ , devido ao tempo decorrido da primeira medição deste erro ser superior ao de uma hora, aqui indicado. Em 6.1.1 fica claro, porém, que a temperatura do óleo hidráulico exerce influência significativa sobre os resultados obtidos, em termos de erro de posicionamento.

### 6.3.2. O tempo de *warm up* em função de $Ep_z$

O comportamento do erro de posicionamento do carro porta-rebolo na direção X, ao longo da direção Z, medido com o auxílio de EA é mostrado na Figura 6.9. Os dados para a construção do gráfico constam no Anexo 8.

Por este método, não foi possível a determinação do tempo de *warm up*, dado que não há um comportamento assintótico dos resultados, como o mostrado na Figura 6.9. Além disto, os intervalos de confiança obtidos são muito grandes, o que caracteriza baixa repetitividade.

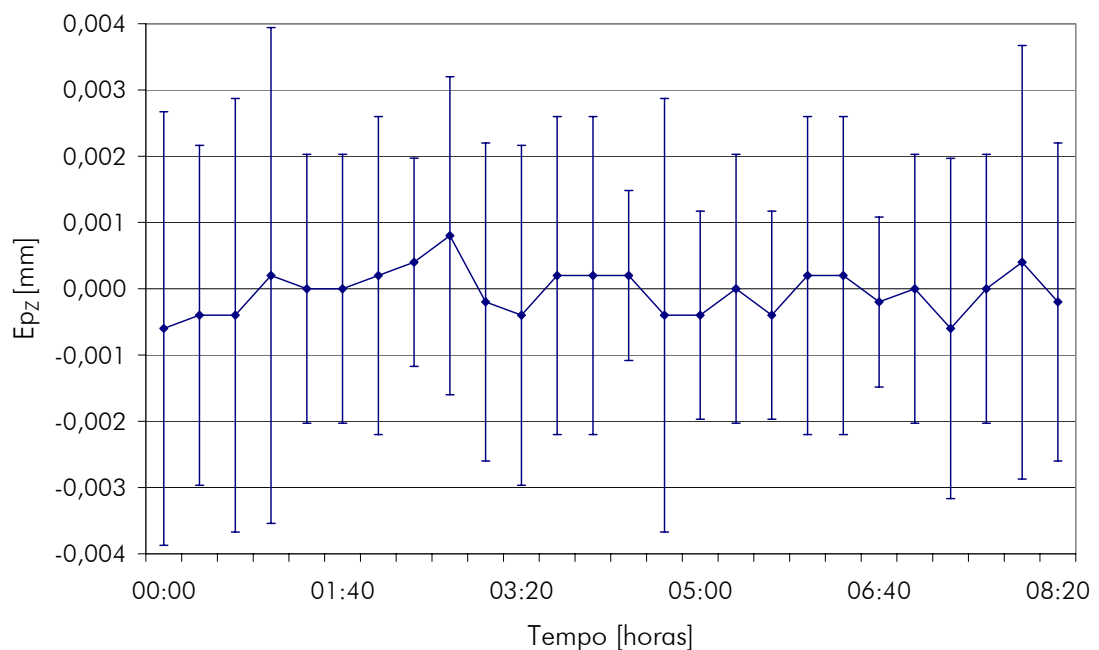


Figura 6.9 – Erro de posicionamento  $Ep_z$  em função do tempo de funcionamento da máquina.

Deste modo, o sistema de medição por EA, com o auxílio da Superfície 1 não se mostra adequado a determinação de  $t_w$ . Os erros aleatórios expressos no gráfico são o somatório dos erros aleatórios do sistema Dittel, com os do sistema de posicionamento da própria retificadora, além da influência do operador e de outros fatores não controlados. A utilização de tal sistema de medição, na determinação do  $t_w$  de uma retificadora Flexa 600-L deve ser, portanto, descartada.



## 7. Conclusões e sugestões para novos trabalhos

### 7.1. Conclusões

A precisão do sistema de posicionamento do carro porta-rebolo da retificadora, associada ao uso de sinais de emissão acústica, normalmente empregados na detecção do toque ferramenta/peça motivaram a investigação detalhada da possibilidade do uso do SISEA para a medição do desgaste radial em discos dressadores.

O sistema de medição da máquina-ferramenta, associado ao sistema de monitoramento por emissão acústica do sistema de dressamento – SISEA – teoricamente permite detectar uma posição de contato entre o disco dressador e uma superfície de referência colocada na máquina-ferramenta com boa repetitividade e dentro dos devidos requisitos de exatidão. Dado, porém, que os resultados obtidos com o SISEA não puderam ser comparados aos obtidos com os do SISLASER, aconselha-se o uso deste último e descarte do primeiro na avaliação do citado desgaste.

As medições realizadas com SISLASER foram realizadas segundo orientações de norma ISO 230-2, que define os procedimentos e cuidados necessários a este tipo de operação. Os resultados foram gerados na forma de gráficos e mostraram haver na máquina, para alguns dos pontos analisados, um erro de posicionamento significativo.

As medições baseadas no uso de SISEA permitiram a constatação de erros de posicionamento de ordens de grandeza aproximados, se comparados aos erros de posicionamento medidos com SISLASER. Foram medidos os erros de posicionamento na direção transversal X ao longo dos eixos X e Z.

A precisão de posicionamento medida, na direção transversal, ao longo dos dois eixos de movimentação do carro porta-rebolo, foi menor  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Tal dado coincidiu com o indicado pelo fabricante da máquina. É necessário frisar que tal precisão é fortemente influenciada pelo sistema de resfriamento do óleo hidráulico empregado na mancalização hidrostática das guias lineares transversal e longitudinal e do mancal do rebolo. Tal influência foi bastante notável durante a realização dos experimentos relacionados a este trabalho.

O erro de posicionamento na direção X, medido ao longo do eixo Z, com o auxílio da Superfície SR apresentou uma precisão de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , se feitas as devidas

considerações. O método de análise, porém, por aferir pouca confiabilidade estatística, não deve ser utilizado.

Os ensaios realizados com SISLASER e com SISEA mostraram que a máquina-ferramenta em que foram realizados os experimentos apresenta erros de posicionamento consideráveis. Mostraram também que a histerese pode ser considerada desprezível. As ordens de grandeza dos erros medidos por ambos os métodos apresentam uma diferença a qual pode ser tratada como um erro sistemático, facilmente corrigível.

O tempo de aquecimento da máquina-ferramenta indicado pelo fabricante não coincidiu com o aqui encontrado. Um possível motivo para tal incompatibilidade é o fato das medições terem sido realizadas em dias com temperaturas ambiente bastante diferentes. De qualquer modo, sugere-se que o tempo de aquecimento seja aumentado de 40 minutos para uma hora.

A máquina retificadora empregada mostra-se potencialmente capaz de obter as precisões para as quais ela foi projetada, desde que sejam tomadas as devidas precauções relativas ao sistema de resfriamento do óleo hidráulico e respeitadas as demais condições de funcionamento estipuladas pelo fabricante.

O uso do método de medição baseado em SISEA mostrou-se não satisfatório e incapaz de medir o desgaste radial do disco dressador com boa precisão, aconselhando-se, por isto, que tal medição seja realizada auxiliada por interferometria óptica.

## **7.2. Sugestões para novos trabalhos**

É necessária uma pesquisa relacionada à influência dos parâmetros de processo no desgaste dos discos dressadores ativos durante o condicionamento de rebolos de CBN com ligante cerâmico-vítreo. Nesta pesquisa, a análise do desgaste radial do dressadores poderia ser feita com o auxílio do método de medição aqui proposto, baseado no uso de SISEA.

Dado o desgaste radial medido por SISEA, sugere-se a implementação de uma matriz de compensação de erros sistemáticos diretamente no CNC na máquina, com posterior comparação dimensional entre peças produzidas com e sem a referida compensação.

Devem ser realizadas comparações entre os erros de medição por SISLASER e por SISEA para diferentes valores de  $Z$ , a fim de se conhecer melhor as diferenças entre os



---

dois métodos de medição e também visando uma melhor qualificação do sistema de medição baseado em sinais de EA.

É interessante também a realização de um estudo, através de simulação numérica, relativo ao comportamento térmico nas guias hidrostáticas, durante o funcionamento da retificadora, dada a sensibilidade da qualidade do sistema de posicionamento em relação à temperatura do óleo hidráulico.

Sugere-se, por fim, a realização de ensaios com outras disposições para o tanque do óleo hidráulico. A atual não favorece a troca de calor e pode estar influenciando, de modo significativo, a velocidade de aquecimento do óleo, o que depõe contra a precisão de posicionamento do carro porta-rebolo.



## 8. Referências

- [01] KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen*. 2. Auflage. Düsseldorf: VDI-VERLAG, 1989.
- [02] BERTALAN, C. *Retificação com rebolos de Nitreto de Boro Cúbico em máquinas-ferramenta convencionais*. Florianópolis. 1997. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [03] WEINGÄRTNER, E. *Influência do sistema de alimentação de fluido lubri-refrigerante na retificação com rebolos de CBN*. Florianópolis. 2004. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [04] LEME, S. P. L. *Dressamento por toque de rebolos de CBN*. Florianópolis. 1999. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [05] MORALES, D. J. T. *Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos de Nitreto de Boro Cúbico (CBN)*. Florianópolis. 2002. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [06] HESSEL, D. *Profilschleifen mit punktcruschierbaren Diamant- und CBN-Schleifscheiben. Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung. Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis*. 5. Seminar „Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung“. Stuttgart, 2004
- [07] MUCKLI, J. *Hochgeschwindigkeitsschleifen mit keramisch gebunden CBN Schleifscheiben*. Aachen. 2000. 177 p. Dissertation (Doutorado em Engenharia) – RWTH, Aachen.
- [08] KLOCKE, F.; KÖNIG, W. *Appropriate Conditioning Strategies Increase the Performance Capabilities of Vitrified-Bond CBN Grinding Wheels*. *Annals of the CIRP*, v. 44, n. 1, p309-314, 1995.
- [09] HOLZ, R.; SAUREN, J. *Schleifen mit Diamant und CBN*. 1. ed. Alemanha: Winter Diamantwerkzeuge Bornitridwerkzeuge, 1988. 172 p.
- [10] JACKSON, M. J., MILLS, B. *Micro scale Wear of Vitrified Abrasive Materials*. *Journal of Material Science*, vol. 39, p2131-2143, 2004.

- [11] WECK, M. "Werkzeugmaschinen, Messtechnische Untersuchung und Beurteilung", 6. Auflage, Springer, Berlin, 2001.
- [12] FREIRE, J. M. Tecnologia Mecânica – Máquinas Limadoras e Retificadoras, vol. 2, 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos S.A., 1978. 223 p.
- [13] STEMMER, C. E. Ferramentas de corte I. 5. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001. 249 p.
- [14] STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1992. 314 p.
- [15] LEE, J.; et. al. "Modern Manufacturing". Mechanical Engineering Handbook. Ed. Frank Kreith. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [16] ODEBRECHT, O. Dressamento de rebolos de Óxido de Alumínio Microcristalino com Dressadores Fixos. Florianópolis. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [17] LAUER-SCHMALTZ, H, KÖNIG. W. Technologische Voraussetzungen für das Hochgeschwindigkeitsschleifen mit Diamant- und CBN-Schleifscheiben. Industrie Anzeiger, Nr. 46, p. 30-34, Juni 1980.
- [18] AULT, W. Types of Grinding Wheels. Handbook of Modern Grinding Technology. Cap. 3, p. 73-87, 1978.
- [19] CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos : características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7.ed., ampl. e rev São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 2002. 599p.
- [20] TABESH, A. D. Important Characteristics of Successful Applications of CBN Production Grinding. Abrasive Engineering Society, p. 68-94, 1990.
- [21] BARROS, R. C. M.; et. al. "Filmes de Diamante CVD Dopado com Boro. Parte I . Histórico, produção e caracterização". Quim. Nova, Vol. 28, No. 2, 317-325, 2005
- [22] KLYK, M. Hochgeschwindigkeitsschleifen mit CBN: Voraussetzungen für die wirtschaftliche Anwendung einer neuen Technologie. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan Verlag, 1993
- [23] SCHÖPF, M. Novo Processo Restaura a Capacidade de Corte e Perfila Superabrasivos. Revista Máquinas e Metais, n. 439, p. 30-37, ago. 2002.
- [24] GRAF, W. Diamant-Abrichtwerkzeuge. Informativo da WST, 1998, p. 2-32.

- [25] [www.ism.kiev.ua/webengl/tools/prav.html](http://www.ism.kiev.ua/webengl/tools/prav.html), página da internet; acesso em 01/11/2005
- [26] MESSER, J. Abrichten konventioneller Schleifscheiben mit stehenden Werkzeugen. 1983, p. 1-110. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Aachen. Aachen.
- [27] DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GmbH. Catálogo de dressadores e de ferramentas de PCD. Celle, 2001.
- [28] LIERSE, T.; KAISER, M; Dressing of grinding wheels for gearwheels; IDR - Industrial Diamond Review; 4/2002
- [29] GUO, C.; MALKIN, S; Invert Heat Transfer Analysis, Part 1: Methods; Journal of Engineering for Industry; February 1996; Vol. 118, pgs. 137-149.
- [30] SCHNEIDER, C. A.; Schoeler, N.; Veiga, C. L. N.; Ensaios Geométricos de Máquinas Ferramentas; Apostila; LABMETRO; UFSC; Florianópolis, 1987.
- [31] VEIGA, C. L. N.; Universidade Federal de Santa Catarina. Aplicações do interferômetro radial plano na medição de translação, deformações e tensões mecânicas. Florianópolis, 2003. 128 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [32] PORTO, A. J. V. (org.); Usinagem de Ultraprecisão; São Carlos: Ed. Rima, FAPESP, 2004, 293p.
- [33] TANIGUCHI, N. (1983), "Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing", Annals of the CIRP 32 (2) 573-582.
- [34] PAHL, G. ; BEITZ, W. "Engineering Design: A Systematic Approach", 2ª ed., Springer-Verlag, 1996.
- [35] KOENIGSBERGER, F., TLUSTY, J. "Machine Tool Structures", Vol. 1, 1ª ed., Pergamon Press, New York, 1970.
- [36] PEREIRA, M.; Metodologia de projeto para sistemas mecânicos de precisão reconfiguráveis. Florianópolis, 2004. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [37] SOUSA, A. R.; SCHNEIDER, C. A.; Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem. Florianópolis, 2000. 204 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.

- [38] SLOCUM, A.H. "Precision Machine Design", 1ª edição, Prentice-Hall, 1992.
- [39] STOETERAU, R. L. Comportamento Estático e Dinâmico de Mancais Aerostáticos Cilíndricos para Guias Lineares. Florianópolis: UFSC, 1992. Dissertação.
- [40] MEHTA, N.K. "Machine Tool Design", 1ª ed., McGraw-Hill Publishing, 1988.
- [41] ALTINTAS, Y., Manufacturing Automation – Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design, Cambridge University Press, 2000.
- [42] THK General Catalog, No. 300-3E, Tokyo, Japan.
- [43] INCROPERA, F. P., DeWITT D. P. : Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa, 3ª Ed., Guanabara Koogan S.A, 454 p.
- [44] DOLIN, S., KOPAC J., Acoustic emission signals for tool wear identification, Elsevier Science, 1999.
- [45] DINIZ, A. E., CUPINI, N. L.; VILELLA, R. C. "Monitoramento do processo de usinagem por emissão acústica". XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, São Paulo, dezembro de 1991.
- [46] FERRARESI, D. Fundamento da Usinagem dos Metais. São Paulo, Ed. Edgard Blucher LTDA, 1977.
- [47] ISO 230-2 - Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes, 2000.
- [48] GONÇALVES JR., A. A.; Universidade Federal de Santa Catarina. Automatização da medição de deslocamentos pela holografia interferométrica. Florianópolis, 1984. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [49] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. Física 4. 4. ed. - Rio de Janeiro: LTC, c1996.338p.
- [50] WEBSTER, J.; MARINESCU, I.; BENNET, R. "Acoustic emission for process control and monitoring of surface integrity during grinding". Annals of the CIRP, volume 43/1, 1994. p. 299-304.
- [51] HELLMEISTER C. F. L. P.; Monitoramento da dressagem e retificação através do sinal puro de emissão acústica, Bauru, 2004, 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista.
- [52] DORNFELD, D. A., CAI, H. G., 1984, An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission. Journal of Engineering for Industry, v. 106, 28-33.

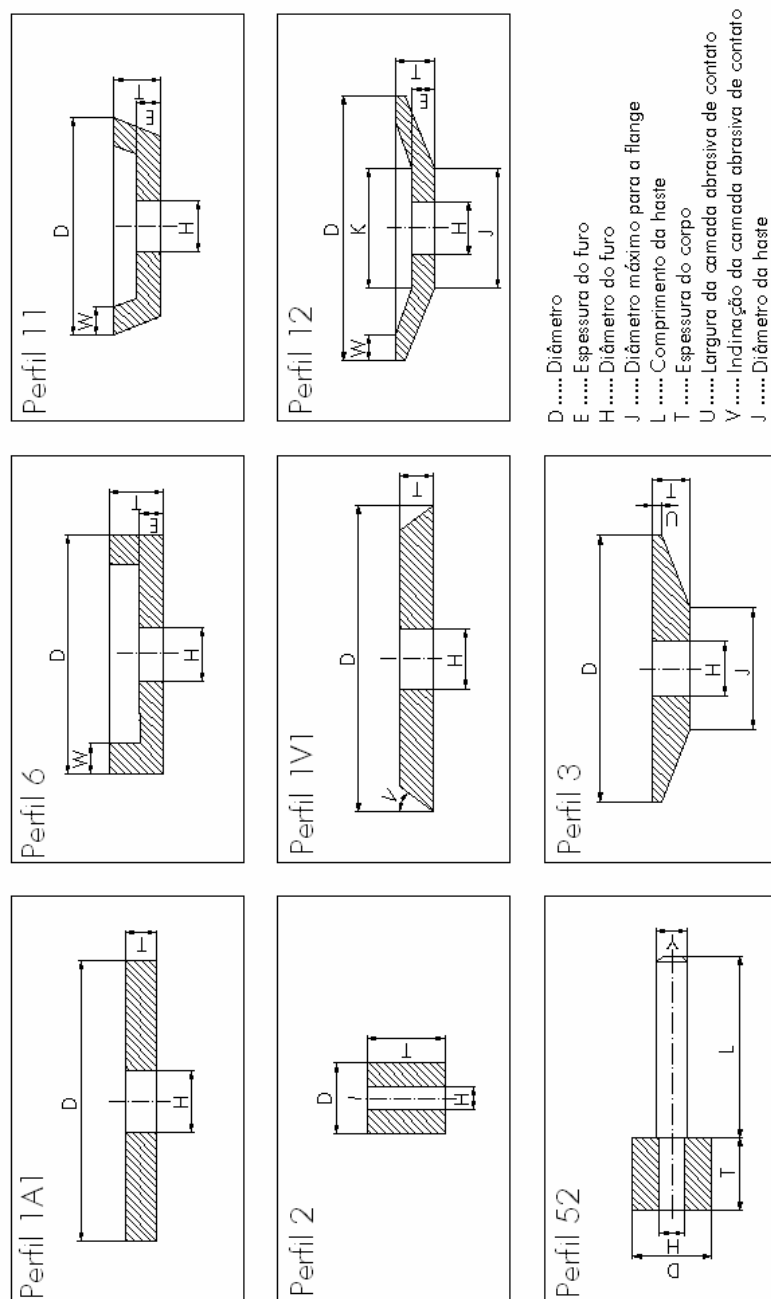
- 
- [53] TÖNSHOFF, H. K. "Development and Trends in Monitoring and Control of Machining Processes", *Annals of the CIRP*, Vol. 37/12/1988. pp. 611-621.
- [54] BARRY \*, J. BYRNE, G. LENNON, D. "Observations on chip formation and acoustic emission in machining Ti-6Al-4V alloy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 41, Issue 7, May 2001, Pages 1055-1070.
- [55] DORNFELD, D. A. "Monitoração de processos por emissão acústica", *Revista Máquinas & Metais*, Maio/1999, pp. 64 – 81.
- [56] OLIVEIRA, J. F. G., DORNFELD, D. A., WINTER, B., 2004, "Dimensional Characterization of Grinding Wheel Through Acoustic Emission", *Annals of the CIRP*, 43/1, 291-294.
- [57] FELIPE, J., OLIVEIRA, J. F. G. "A retificação inteligente é mais confiável e menos dependente do operador", *Revista Máquinas e Metais*, Março/1998, pp. 80 – 98.
- [58] LICHT, T. "Acoustic emission," *Brüel and Kjaer Techn. Rev.*, No. 2, 3-36 (1979)
- [59] LIU, J.J.B. Monitoring the precision machining process: sensor, signal, processing and information analysis. Berkeley: Dept. of Mech. Eng. of University of California, 171p, 1991 (PhD Tesis).
- [60] JOHNSON, R. A. *Miller and Freund's Probability and statistics for engineers*. 5. ed. Prentice-Hall International, 1994.
- [61] ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A.; *Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial*, Apostila, fundação CERTI, Reg. 5569, 2004.





## Anexo 1 – Perfis de rebolos

As figuras abaixo representam alguns perfis conforme a FEPA (organização dos fabricantes europeus de abrasivos).



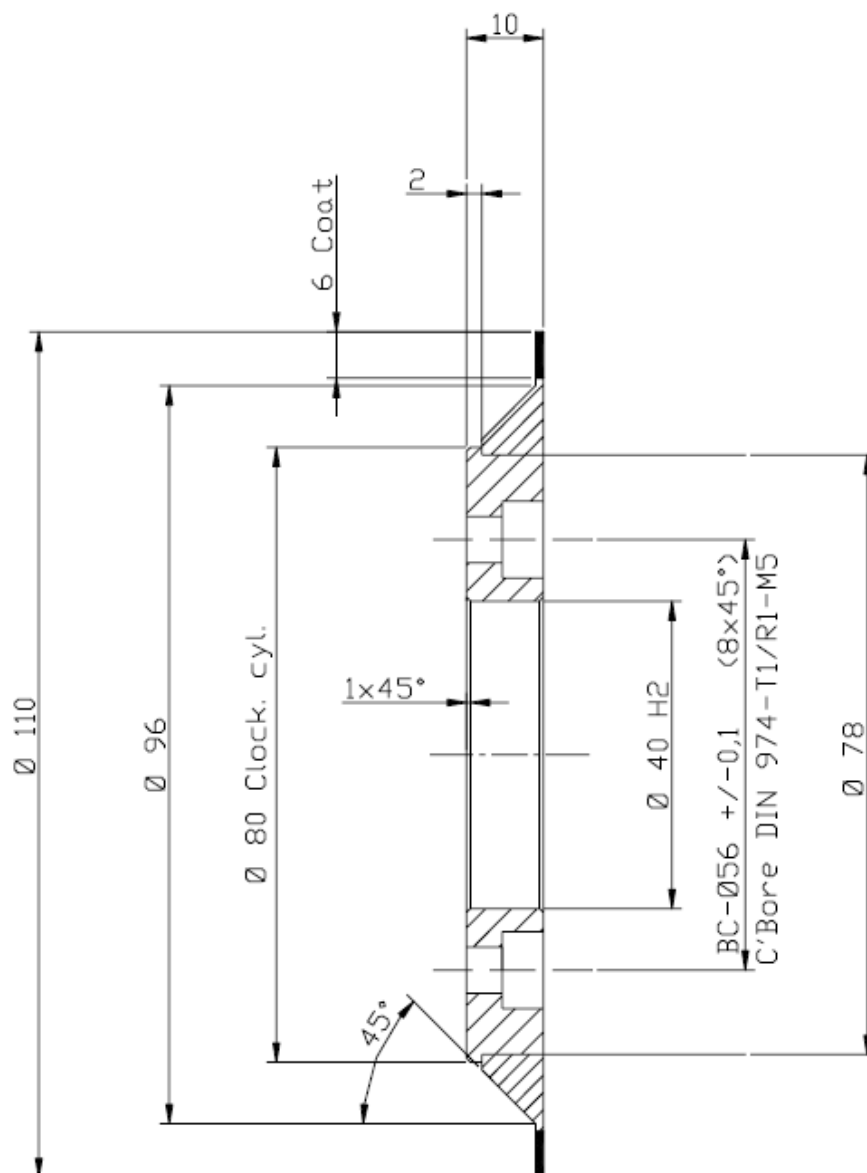
## Anexo 2 – Disco dressador diamantado

A seguir constam as especificações do disco dressador diamantado utilizado nos experimentos deste trabalho de pesquisa:

Fabricante: DR. KAISER DIAMANTWERKZEUGE

Especificação: RI40 IN2515 110 0,8 6 40 10 TK D251 C150

Número da ferramenta: RI 3615



### Anexo 3 – Dados referentes às medições com SISLASER

Neste anexo são mostrado os dados relativos ao erro de posicionamento  $Ep_{XL}$ . São tomados 11 pontos de medição. O sentido de movimentação do carro porta-rebolo pode ser positivo (ida) ou negativo (volta). Os valores  $X_R$  são os de referência, indicados no comando numérico da máquina. Para cada um destes pontos são feitas cinco ou três observações com o SISLASER –  $X_i$ , para  $i$  de 1 a 5 ou de 1 a 3 – a destas, tomadas as médias  $Ep_{IXML\ ida}$  ou  $Ep_{IXML\ volta}$ , onde  $l$  é o tempo de funcionamento decorrido da retificadora, de 2, 4, 6 ou 8 horas. Destes valores são calculadas as incertezas de medição  $IM$ , com o auxílio do desvio padrão da média  $s$  e do coeficiente de Student  $t$ .

Dados coletados para duas horas de funcionamento da máquina, sentidos positivo (ida) e negativo (volta).

Ponto	XR	X1	X2	X3	X4	X5	$Ep_{2XML\ ida}$	s	t	IM
1	300	-0,0009	-0,0059	-0,0040	-0,0001	-0,0018	-0,0025	0,0024	2,869	0,007
2	307	0,0083	0,0020	0,0044	0,0044	0,0071	0,0052	0,0025	2,869	0,007
3	314	-0,0002	-0,0052	-0,0073	-0,0029	0,0020	-0,0027	0,0037	2,869	0,011
4	321	0,0118	0,0064	0,0067	0,0102	0,0110	0,0092	0,0025	2,869	0,007
5	328	0,0095	0,0042	0,0034	0,0082	0,0071	0,0065	0,0026	2,869	0,007
6	335	0,0140	0,0108	0,0096	0,0134	0,0134	0,0122	0,0019	2,869	0,006
7	342	0,0193	0,0130	0,0125	0,0167	0,0193	0,0162	0,0033	2,869	0,009
8	349	0,0114	0,0088	0,0095	0,0138	0,0150	0,0117	0,0027	2,869	0,008
9	356	0,0245	0,0200	0,0222	0,0228	0,0243	0,0228	0,0018	2,869	0,005
10	363	0,0156	0,0124	0,0130	0,0140	0,0181	0,0146	0,0023	2,869	0,007
11	370	0,0262	0,0234	0,0247	0,0260	0,0295	0,0260	0,0023	2,869	0,007

Ponto	XR	X1	X2	X3	X4	X5	$Ep_{2XML\ volta}$	s	t	IM
1	300	-0,0044	-0,0047	-0,0026	-0,0030	0,0011	-0,0027	0,0023	2,869	0,007
2	307	0,0045	0,0025	0,0053	0,0040	-0,0082	0,0016	0,0056	2,869	0,016
3	314	-0,0015	-0,0042	-0,0021	0,0006	0,0059	-0,0003	0,0038	2,869	0,011
4	321	0,0106	0,0079	0,0104	0,0104	0,0133	0,0105	0,0019	2,869	0,005
5	328	0,0076	0,0060	0,0101	0,0090	0,0154	0,0096	0,0036	2,869	0,010
6	335	0,0092	0,0055	0,0091	0,0104	0,0152	0,0099	0,0035	2,869	0,010
7	342	0,0167	0,0138	0,0182	0,0203	0,0224	0,0183	0,0033	2,869	0,009
8	349	0,0105	0,0063	0,0125	0,0126	0,0163	0,0116	0,0036	2,869	0,010
9	356	0,0260	0,0223	0,0237	0,0265	0,0286	0,0254	0,0025	2,869	0,007
10	363	0,0188	0,0135	0,0167	0,0186	0,0222	0,0180	0,0032	2,869	0,009
11	370	0,0273	0,0225	0,0250	0,0253	0,0258	0,0252	0,0017	2,869	0,005

Dados coletados para quatro horas de funcionamento da máquina, sentidos positivo (ida) e negativo (volta).

Ponto	XR	X1	X2	X3	Ep <sub>4XML ida</sub>	s	t	IM
1	300	-0,0009	-0,0059	-0,0040	-0,0036	0,0025	4,527	0,011
2	307	0,0083	0,0020	0,0044	0,0049	0,0032	4,527	0,014
3	314	-0,0002	-0,0052	-0,0073	-0,0042	0,0036	4,527	0,017
4	321	0,0118	0,0064	0,0067	0,0083	0,0030	4,527	0,014
5	328	0,0095	0,0042	0,0034	0,0057	0,0033	4,527	0,015
6	335	0,0140	0,0108	0,0096	0,0115	0,0023	4,527	0,010
7	342	0,0193	0,0130	0,0125	0,0149	0,0038	4,527	0,017
8	349	0,0114	0,0088	0,0095	0,0099	0,0013	4,527	0,006
9	356	0,0245	0,0200	0,0222	0,0222	0,0023	4,527	0,010
10	363	0,0156	0,0124	0,0130	0,0137	0,0017	4,527	0,008
11	370	0,0262	0,0234	0,0247	0,0248	0,0014	4,527	0,006

Ponto	XR	X1	X2	X3	Ep <sub>4XML volta</sub>	s	t	IM
1	300	-0,0044	-0,0047	-0,0026	-0,0039	0,0011	4,527	0,005
2	307	0,0045	0,0025	0,0053	0,0041	0,0014	4,527	0,007
3	314	-0,0015	-0,0042	-0,0021	-0,0026	0,0014	4,527	0,006
4	321	0,0106	0,0079	0,0104	0,0096	0,0015	4,527	0,007
5	328	0,0076	0,0060	0,0101	0,0079	0,0021	4,527	0,009
6	335	0,0092	0,0055	0,0091	0,0079	0,0021	4,527	0,010
7	342	0,0167	0,0138	0,0182	0,0162	0,0022	4,527	0,010
8	349	0,0105	0,0063	0,0125	0,0098	0,0032	4,527	0,014
9	356	0,0260	0,0223	0,0237	0,0240	0,0019	4,527	0,008
10	363	0,0188	0,0135	0,0167	0,0163	0,0027	4,527	0,012
11	370	0,0273	0,0225	0,0250	0,0249	0,0024	4,527	0,011

Dados coletados para seis horas de funcionamento da máquina, sentidos positivo (ida) e negativo (volta).

Ponto	XR	X1	X2	X3	$E_{p_{XML\_ida}}$	s	t	IM
1	300	-0,0001	-0,0018	0,0026	0,0002	0,0022	4,527	0,010
2	307	0,0044	0,0071	0,0125	0,0080	0,0041	4,527	0,019
3	314	-0,0029	0,0020	0,0021	0,0004	0,0029	4,527	0,013
4	321	0,0102	0,0110	0,0165	0,0126	0,0034	4,527	0,016
5	328	0,0082	0,0071	0,0123	0,0092	0,0027	4,527	0,012
6	335	0,0134	0,0134	0,0177	0,0148	0,0025	4,527	0,011
7	342	0,0167	0,0193	0,0219	0,0193	0,0026	4,527	0,012
8	349	0,0138	0,0150	0,0172	0,0153	0,0017	4,527	0,008
9	356	0,0228	0,0243	0,0293	0,0255	0,0034	4,527	0,015
10	363	0,0140	0,0181	0,0206	0,0176	0,0033	4,527	0,015
11	370	0,0260	0,0295	0,0313	0,0289	0,0027	4,527	0,012

Ponto	XR	X1	X2	X3	$E_{p_{XML\_volta}}$	s	t	IM
1	300	-0,0030	0,0011	0,0010	-0,0003	0,0023	4,527	0,011
2	307	0,0040	0,0082	0,0101	0,0074	0,0031	4,527	0,014
3	314	0,0006	0,0059	0,0010	0,0025	0,0030	4,527	0,013
4	321	0,0104	0,0133	0,0128	0,0122	0,0016	4,527	0,007
5	328	0,0090	0,0154	0,0139	0,0128	0,0033	4,527	0,015
6	335	0,0104	0,0152	0,0135	0,0130	0,0024	4,527	0,011
7	342	0,0203	0,0224	0,0213	0,0213	0,0011	4,527	0,005
8	349	0,0126	0,0163	0,0182	0,0157	0,0028	4,527	0,013
9	356	0,0265	0,0286	0,0302	0,0284	0,0019	4,527	0,008
10	363	0,0186	0,0222	0,0237	0,0215	0,0026	4,527	0,012
11	370	0,0253	0,0258	0,0283	0,0265	0,0016	4,527	0,007

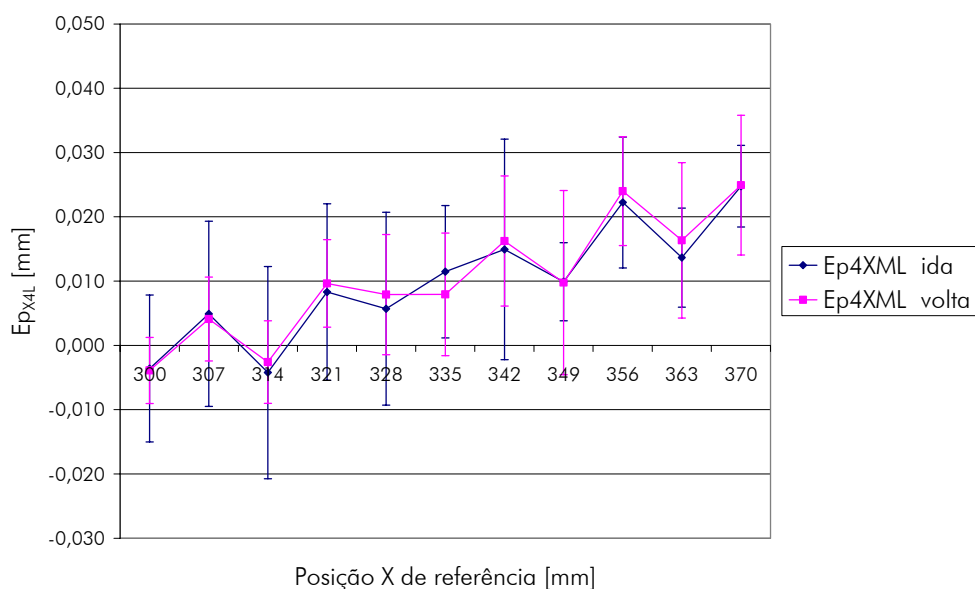
Dados coletados para oito horas de funcionamento da máquina, sentidos positivo (ida) e negativo (volta).

Ponto	XR	X1	X2	X3	$Ep8_{XML\ ida}$	s	t	IM
1	300	0,0004	-0,0057	-0,0060	-0,0038	0,0036	4,527	0,016
2	307	0,0063	0,0024	0,0012	0,0033	0,0027	4,527	0,012
3	314	-0,0029	-0,0058	-0,0075	-0,0054	0,0023	4,527	0,011
4	321	0,0096	0,0049	0,0079	0,0075	0,0024	4,527	0,011
5	328	0,0060	0,0018	0,0014	0,0031	0,0025	4,527	0,012
6	335	0,0114	0,0074	0,0103	0,0097	0,0021	4,527	0,009
7	342	0,0163	0,0117	0,0138	0,0139	0,0023	4,527	0,010
8	349	0,0118	0,0087	0,0089	0,0098	0,0017	4,527	0,008
9	356	0,0237	0,0174	0,0219	0,0210	0,0032	4,527	0,015
10	363	0,0151	0,0110	0,0129	0,0130	0,0021	4,527	0,009
11	370	0,0244	0,0192	0,0250	0,0229	0,0032	4,527	0,014

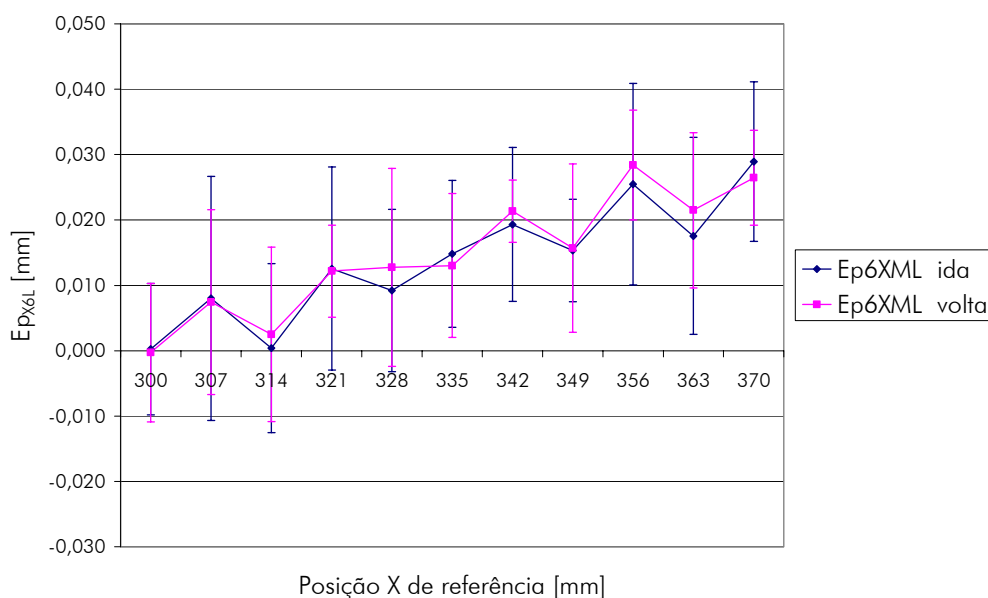
Ponto	XR	X1	X2	X3	$Ep8_{XML\ volta}$	s	t	IM
1	300	-0,0067	-0,0066	-0,0023	-0,0052	0,0025	4,527	0,011
2	307	0,0012	0,0024	0,0070	0,0035	0,0031	4,527	0,014
3	314	-0,0050	-0,0049	0,0012	-0,0029	0,0036	4,527	0,016
4	321	0,0053	0,0047	0,0101	0,0067	0,0030	4,527	0,013
5	328	0,0079	0,0051	0,0122	0,0084	0,0036	4,527	0,016
6	335	0,0066	0,0050	0,0113	0,0076	0,0033	4,527	0,015
7	342	0,0175	0,0141	0,0181	0,0166	0,0022	4,527	0,010
8	349	0,0128	0,0097	0,0130	0,0118	0,0019	4,527	0,008
9	356	0,0225	0,0195	0,0240	0,0220	0,0023	4,527	0,010
10	363	0,0165	0,0131	0,0183	0,0160	0,0026	4,527	0,012
11	370	0,0223	0,0194	0,0237	0,0218	0,0022	4,527	0,010

## Anexo 4 – Comportamento de $Ep_{XL}$ para quatro, seis e oito horas

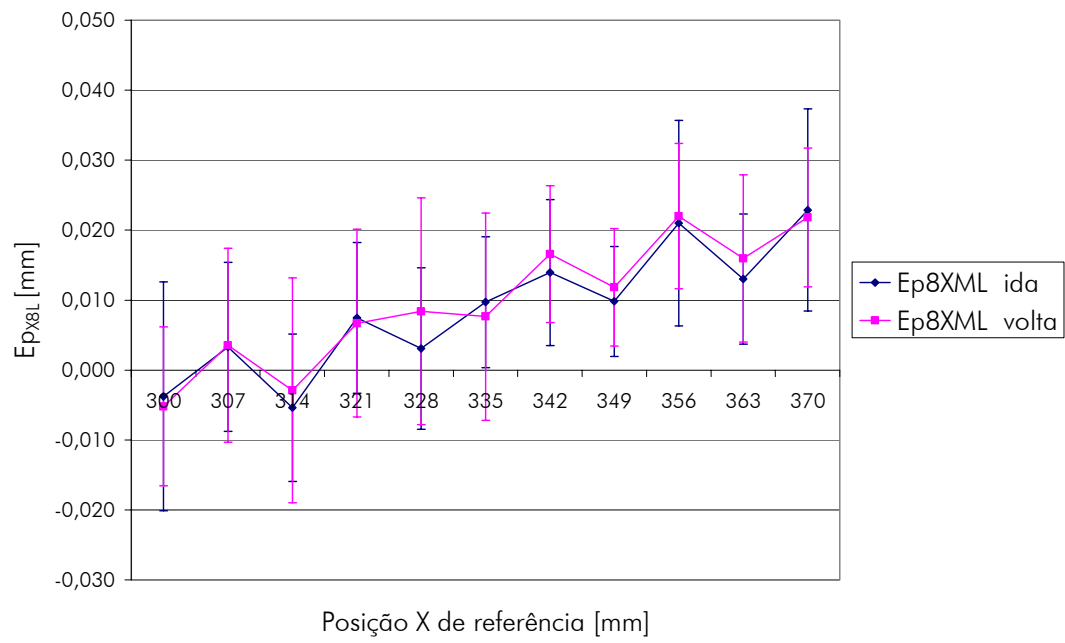
Gráficos do comportamento de  $Ep_{XL}$  para os tempos de funcionamento da máquina iguais a quatro, seis e oito horas, nos sentidos positivo –  $Ep_{iXML\ ida}$  – e negativo –  $Ep_{iXML\ volta}$ . O índice  $i$  corresponde ao tempo de funcionamento.



Erro de posicionamento  $Ep_{XL}$  para quatro horas de funcionamento.



Erro de posicionamento  $Ep_{XL}$  para seis horas de funcionamento.



Erro de posicionamento  $Ep_{XL}$  para oito horas de funcionamento.



## Anexo 5 – Análise da variação de $Ep_{XL}$

Variação de  $Ep_{XL}$  no tempo.

Pto	$X_i$	$Ep2XML$	$Ep4XML$	$Ep6XML$	$Ep8XML$	$Ep2 - Ep4$	$Ep4 - Ep6$	$Ep6 - Ep8$
1	300	-0,0026	-0,0038	0,0000	-0,0045	0,0011	-0,0037	0,0045
2	307	0,0034	0,0045	0,0077	0,0034	-0,0011	-0,0032	0,0043
3	314	-0,0015	-0,0034	0,0015	-0,0042	0,0019	-0,0049	0,0056
4	321	0,0099	0,0090	0,0124	0,0071	0,0009	-0,0034	0,0053
5	328	0,0081	0,0068	0,0110	0,0057	0,0013	-0,0042	0,0053
6	335	0,0111	0,0097	0,0139	0,0087	0,0014	-0,0042	0,0053
7	342	0,0172	0,0156	0,0203	0,0153	0,0016	-0,0047	0,0051
8	349	0,0117	0,0098	0,0155	0,0108	0,0018	-0,0057	0,0047
9	356	0,0241	0,0231	0,0270	0,0215	0,0010	-0,0038	0,0054
10	363	0,0163	0,0150	0,0195	0,0145	0,0013	-0,0045	0,0051
11	370	0,0256	0,0249	0,0277	0,0223	0,0007	-0,0029	0,0054

## Anexo 6 – Erro de posicionamento $E_{pz}$

Os valores medidos de  $E_{pz}$  em função da posição longitudinal Z são dados nas tabelas a seguir. Foram feitos cinco conjuntos de medição .

Dados para medição de  $E_{pz}$  – conjuntos 1, 2 e 3.

Conjunto 1			Conjunto 2			Conjunto 3		
X [mm]	$E_{pz}$ [mm]	Z [mm]	X [mm]	$E_{pz}$ [mm]	Z [mm]	X [mm]	$E_{pz}$ [mm]	Z [mm]
169,940	0,000	56,126	169,934	-0,002	66,526	169,942	-0,001	76,926
169,939	-0,001	56,526	169,936	0,000	66,926	169,942	-0,001	77,326
169,939	-0,001	56,926	169,936	0,000	67,326	169,943	0,000	77,726
169,939	-0,001	57,326	169,937	0,001	67,726	169,943	0,000	78,126
169,940	0,000	57,726	169,936	0,000	68,126	169,943	0,000	78,526
169,940	0,000	58,126	169,936	0,000	68,526	169,943	0,000	78,926
169,939	-0,001	58,526	169,936	0,000	68,926	169,943	0,000	79,326
169,940	0,000	58,926	169,936	0,000	69,326	169,943	0,000	79,726
169,940	0,000	59,326	169,936	0,000	69,726	169,944	0,001	80,126
169,941	0,001	59,726	169,935	-0,001	70,126	169,942	-0,001	80,526
169,941	0,001	60,126	169,935	-0,001	70,526	169,942	-0,001	80,926
169,941	0,001	60,526	169,936	0,000	70,926	169,943	0,000	81,326
169,940	0,000	60,926	169,936	0,000	71,326	169,944	0,001	81,726
169,940	0,000	61,326	169,936	0,000	71,726	169,943	0,000	82,126
169,939	-0,001	61,726	169,936	0,000	72,126	169,943	0,000	82,526
169,940	0,000	62,126	169,935	-0,001	72,526	169,943	0,000	82,926
169,940	0,000	62,526	169,936	0,000	72,926	169,943	0,000	83,326
169,940	0,000	62,926	169,935	-0,001	73,326	169,943	0,000	83,726
169,941	0,001	63,326	169,936	0,000	73,726	169,943	0,000	84,126
169,941	0,001	63,726	169,936	0,000	74,126	169,942	-0,001	84,526
169,940	0,000	64,126	169,936	0,000	74,526	169,943	0,000	84,926
169,940	0,000	64,526	169,936	0,000	74,926	169,943	0,000	85,326
169,940	0,000	64,926	169,935	-0,001	75,326	169,941	-0,002	85,726
169,940	0,000	65,326	169,936	0,000	75,726	169,942	-0,001	86,126
169,940	0,000	65,726	169,937	0,001	76,126	169,943	0,000	86,526
169,939	-0,001	66,126	169,936	0,000	76,526	169,943	0,000	86,926
169,940			169,936			169,943		
média			média			média		

Dados para medição de  $E_{pz}$  – conjuntos 4 e 5.

Conjunto 4			Conjunto 5		
X [mm]	$E_{pz}$ [mm]	Z [mm]	X [mm]	$E_{pz}$ [mm]	Z [mm]
169,936	0,001	87,326	169,937	-0,001	97,726
169,936	0,001	87,726	169,938	-0,001	98,126
169,936	0,001	88,126	169,937	-0,002	98,526
169,937	0,002	88,526	169,938	-0,001	98,926
169,936	0,001	88,926	169,938	-0,001	99,326
169,936	0,001	89,326	169,938	-0,001	99,726
169,936	0,001	89,726	169,940	0,001	100,126
169,936	0,001	90,126	169,940	0,001	100,526
169,936	0,001	90,526	169,941	0,002	100,926
169,935	0,000	90,926	169,939	0,000	101,326
169,935	0,000	91,326	169,938	-0,001	101,726
169,936	0,001	91,726	169,938	-0,001	102,126
169,936	0,001	92,126	169,938	-0,001	102,526
169,936	0,001	92,526	169,939	0,000	102,926
169,936	0,001	92,926	169,937	-0,002	103,326
169,935	0,000	93,326	169,938	-0,001	103,726
169,936	0,001	93,726	169,938	-0,001	104,126
169,935	0,000	94,126	169,938	-0,001	104,526
169,936	0,001	94,526	169,938	-0,001	104,926
169,936	0,001	94,926	169,939	0,000	105,326
169,934	-0,001	95,326	169,939	0,000	105,726
169,936	0,001	95,726	169,938	-0,001	106,126
169,935	0,000	96,126	169,939	0,000	106,526
169,936	0,001	96,526	169,939	0,000	106,926
169,937	0,002	96,926	169,938	-0,001	107,326
169,936	0,001	97,326	169,938	-0,001	107,726
169,936			169,938		
média			média		

## Anexo 7 – Aquecimento do óleo do hidráulico

Na tabela a seguir são expostos os valores medidos, relativos a  $T_R$  para os cinco dias de ensaio. Na tabela,  $TR_{Média}$  é a média das medições feitas, são os desvio padrão das médias e  $t$  o coeficiente de Student, empregados para os cálculos das incertezas de medição IM.

Valores de temperatura do reservatório ao longo do tempo para a medição do tempo de warm up.

delta t	TR - 05.12	TR - 06.12	TR - 07.12	TR - 08.12	TR - 11.12	TR - Média	s	t	IM
00:00	27,0	22,3	25,0	23,0	24,3	24,3	1,835	2,869	5,264
00:20	28,0	29,9	25,2	25,4	27,1	27,1	1,946	2,869	5,583
00:40	28,9	30,0	27,9	29,0	29,0	29,0	0,743	2,869	2,133
01:00	29,0	31,0	27,0	29,6	29,2	29,2	1,438	2,869	4,125
01:20	29,6	30,5	29,6	30,0	29,9	29,9	0,370	2,869	1,061
01:40	30,0	31,0	30,0	30,0	30,3	30,3	0,433	2,869	1,242
02:00	30,4	31,5	30,4	30,2	30,6	30,6	0,512	2,869	1,468
02:20	30,6	32,0	30,6	30,0	30,8	30,8	0,735	2,869	2,108
02:40	30,4	32,0	31,0	30,5	31,1	31,0	0,637	2,869	1,829
03:00	30,4	32,0	31,1	31,0	31,4	31,2	0,587	2,869	1,685
03:20	30,0	32,2	31,0	31,5	31,3	31,2	0,802	2,869	2,301
03:40	30,2	32,0	31,2	31,5	31,3	31,2	0,658	2,869	1,888
04:00	31,0	32,0	31,1	32,0	31,3	31,5	0,492	2,869	1,411
04:20	31,0	32,2	31,0	32,7	31,7	31,7	0,747	2,869	2,142
04:40	31,0	32,2	31,1	32,7	31,7	31,7	0,723	2,869	2,074
05:00	31,2	33,0	31,2	32,8	32,1	32,1	0,853	2,869	2,447
05:20	31,3	33,0	31,3	33,0	32,2	32,2	0,850	2,869	2,439
05:40	31,9	32,5	31,9	33,0	32,3	32,3	0,460	2,869	1,321
06:00	32,0	33,0	32,0	33,0	32,5	32,5	0,500	2,869	1,435
06:20	32,1	32,7	32,1	33,0	32,5	32,5	0,390	2,869	1,118
06:40	32,2	32,7	32,5	33,0	32,6	32,6	0,292	2,869	0,836
07:00	32,3	33,0	32,5	33,2	32,8	32,8	0,364	2,869	1,044
07:20	32,5	33,0	32,5	33,2	32,8	32,8	0,308	2,869	0,884
07:40	32,5	33,0	32,5	33,2	32,8	32,8	0,308	2,869	0,884
08:00	32,5	33,0	32,5	33,2	32,8	32,8	0,308	2,869	0,884
08:20	32,5	33,0	32,5	33,2	32,8	32,8	0,308	2,869	0,884

## Anexo 8 – Tempo de warm up em função de $Ep_z$

A seguir constam os dados referentes às medições do erro de posicionamento do carro porta-ferramenta na direção X, ao longo da direção longitudinal Z, com o auxílio de sinais de emissão acústica.

Comportamento de  $Ep_z$  ao longo do tempo

delta t	dx - 05.12	dx - 06.12	dx - 07.12	dx - 08.12	dx - 11.12	Media dx	s	t	IM
00:00	0,000	-0,002	-0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,001	2,869	0,003
00:20	-0,001	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,003
00:40	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,002	0,000	0,001	2,869	0,003
01:00	-0,001	0,001	0,000	0,002	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,004
01:20	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
01:40	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
02:00	-0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
02:20	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
02:40	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	2,869	0,002
03:00	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	2,869	0,002
03:20	0,001	-0,001	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,003
03:40	0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
04:00	0,000	0,000	0,001	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
04:20	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	2,869	0,001
04:40	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,002	0,000	0,001	2,869	0,003
05:00	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
05:20	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
05:40	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
06:00	0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
06:20	0,001	0,000	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	2,869	0,002
06:40	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	2,869	0,001
07:00	0,000	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002
07:20	0,000	-0,001	-0,002	0,000	0,000	-0,001	0,001	2,869	0,003
07:40	0,000	0,000	-0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	2,869	0,002
08:00	0,000	0,001	0,000	0,002	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,003
08:20	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,000	0,001	2,869	0,002